

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织  
国际局



(43) 国际公布日:  
2005年7月21日(21.07.2005)

PCT

(10) 国际公布号:  
WO 2005/066648 A1

(51) 国际分类<sup>7</sup>: G01R.31/34, 25/00

(21) 国际申请号: PCT/CN2003/001153

(22) 国际申请日: 2003年12月31日(31.12.2003)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71)(72) 发明人/申请人: 王照雷(WANG, Zhaolei) [CN/CN]; 中国河南省济源市五龙口镇华能沁北发电厂运行部, Henan 454662 (CN)。

(72) 发明人:及

(75) 发明人/申请人(仅对美国): 华泽玺(HUA, Zexi) [CN/CN]; 中国河南省济源市五龙口镇华能沁北发电厂运行部, Henan 454662 (CN)。

(74) 代理人: 隆天国际知识产权代理有限公司(LUNG TIN INTERNATIONAL INTELLECTUAL PROPERTY AGENT LTD.); 中国北京市朝阳区慧忠路5号远大中心B座18层, Beijing 100101 (CN)。

(81) 指定国(国家): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU,

CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW

(84) 指定国(地区): ARIPO专利(BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚专利(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), 欧洲专利(AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI专利(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG)

根据细则4.17的声明:

— 发明人资格(细则4.17(iv))仅对美国

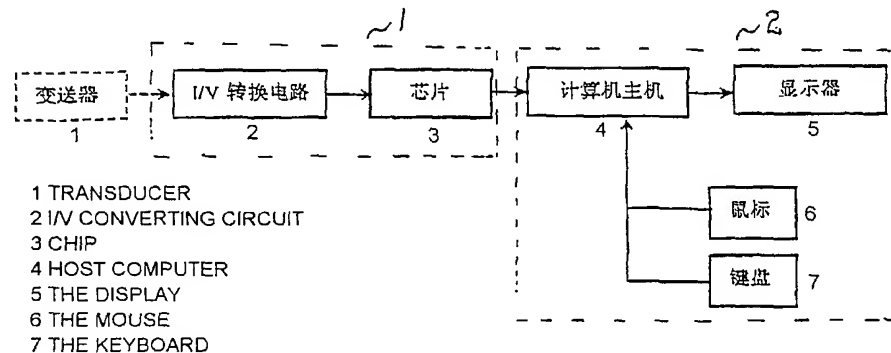
本国际公布:

— 包括国际检索报告。

所引用双字母代码和其它缩写符号, 请参考刊登在每期PCT公报期刊起始的“代码及缩写符号简要说明”。

(54) Title: A METHOD FOR MEASURING THE OPERATING STATE OF A SYNCHRONOUS MOTOR USING COMPOSITE POWER ANGLE METER

(54) 发明名称: 利用复合功率角仪测量同步电机运行状态的方法



(57) Abstract: The present invention discloses a method for measuring the operating state of a synchronous motor using composite power angle meter. It includes the following steps: a, obtaining all kinds of signals of the synchronous motor as well as the system; b, converting the electric signals described above into digital signals by data collection part in the composite power angle meter and inputting all the digital signals to a host computer; c, inputting related parameters or commands to the host computer by using the keyboard and mouse; d, the host computer calculating the motor's related data according to a program, obtaining the coordinates of related points as well as related data, and inputting the results to a image displaying program; e, by using the coordinates of main points and the calculated results, the host computer displaying graphs on the display by the processing of the image displaying program, the graphs showing dynamic composite power angle and compound leakage magnetism in the motor's end which change along with the change in the motor's parameters. The method supplied by the present invention can reflect the operating state of the synchronous motor directly from electric and mechanic aspects, and reflect the situation of the compound leakage magnetism in the synchronous motor's end.

[见续页]



---

(57) 摘要

本发明公开了一种利用复合功角仪测量同步电机运行状态的方法，它包括以下步骤：a、获取同步电机及系统各种信号；b、通过复合功角仪内部的数据采集部分将上述电信号转换成数字信号，并将所有数字信号输入计算机主机；c、利用键盘和鼠标向计算机主机输入相关参数或命令；d、计算机主机对电机的有关数据按程序演算，得到有关点的坐标及相关数据，并将结果输入显像程序；e、计算机主机利用主要点的坐标及运算结果，通过显像程序处理，由显示器显示随电机参数变化而变化的动态复合功角图和电机端部合成漏磁图。本发明提供的方法可从电气和机械两方面直观反映同步电机的运行状态，反映同步电机端部合成漏磁情况。

## 利用复合功角仪测量同步电机运行状态的方法

### 技术领域

本发明涉及一种利用复合功角仪测量同步电机运行状态的方法，属于电力系统电机学领域。

### 背景技术

在电力系统生产实践过程中，人们需要不断地监测同步电机的运行状态，以确保同步电机工作在最佳状态。目前，电力系统生产现场普遍利用各种仪表显示同步电机的电流、电压、功率等有关电气量，特别是使用功角仪测量同步电机的功角及有关电气量，并通过电视画面显示同步电机的电气功角矢量图（如图 6、图 15 所示），为运行人员提供直观的电气矢量图。

但是，目前使用的各种电气测量仪器也有不足，以可以显示凸极同步电机电气量和电气矢量图的功角仪为例，这种同步电机功角仪的缺点是：

1、功角仪只能显示同步电机的电气功角矢量图（如图 6 所示），而不能直接显示同步电机定子、转子之间的机械关系。

2、虽然，这种功角仪可以显示同步电机的电气功角矢量图，反映同步电机的定子电枢电势、励磁电势、机端电压和功角等电气量，但是，它却无法用最佳线段显示同步电机有功、无功功率的大小、同步电机其他量的有功和无功分量的大小。

3、不能满足从事同步电机监视和操作的各类专业人员的需要。随着电力科技的发展，大部分电厂发电机组实现了程序集中控制，从事发电机运行监控和操作的电气专业人员与其他专业人员相比，所占比例越来越少。而同步电机功角仪所显示的电气功角矢量图对于非电气专业人员来说理解比较困难。

4、这种功角仪不能用于同步电机同期并网监视。

5、这种功角仪不能显示同步电机端部漏磁状况。

### 发明内容

鉴于上述原因，本发明的目的是提供一种利用复合功角仪测量同步电机运行状态的方法，该方法可从电气和机械两方面直观反映同步电机的各种运行状态，有利于各种专业运行人员从电气、机械两方面辨证理解同步电机工作原理，为机械化分析同步电机并网运行状态提供了直观的模型，并通过绘制同步电机端部合成漏磁图，为运行人员提供了分析和监视同步电机端部发热状况的画面。

为实现上述目的，本发明采用以下技术方案：一种利用复合功角仪测量同步电机运行状态的方法，它包括以下步骤：

- a、获取同步电机及系统的各种电信号；获取有关设备的数字信号；
- b、通过复合功角仪内部的数据采集部分将上述电信号转换成数字信号，并将有关数字信号输入计算机主机；
- c、利用键盘和鼠标向计算机主机输入相关参数或命令；
- d、由计算机对相关数据进行程序处理，按计算程序演算，得到有关点的坐标及相关数据并将结果输入显像程序；
- e、计算机利用主要点的坐标及运算结果，通过显像程序处理，绘制同步电机的各种电气及机械模型图，由显示器显示随电机参数变化而变化的动态复合功角图，并实现报警功能；
- f、计算机利用主要点的坐标及运算结果，通过显像程序处理，绘制同步电机的端部合成漏磁图，由显示器显示随电机参数变化而变化的同步电机的端部合成漏磁图，并实现报警功能。

本发明一种利用复合功角仪测量同步电机运行状态的方法，其中，程序处理包括显像程序和计算程序两部分处理；显像程序处理包括：建立图像坐标、成像；计算程序处理包括：确定参数、参数计算、报警。

由于本发明采用以上技术方案，即利用复合功角仪实时获取同步电机定子电压、电流信号，励磁电压、电流信号，励磁调节信号以及系统电压信号；执行其内部的控制程序，实时计算同步电机的有关参数；绘制表示同步电机各种特性的电气和机械模型图；绘制表示同步电机的端部合成漏磁图，并通过显示器显示出来，所以，本发明与传统的利用同步电机功角仪测量同步电机运行状态的方法相比具有以下优点：

1、本发明可从电气和机械两方面直观反映同步电机的运行状态。本发明不仅可以显示同步电机的电气功角矢量图，还可以显示同步电机的复合功角图、电机机械模型图、电机机械模型简图和电机同期复合功角图。与传统的功角仪显示的图形相比增加了：同步电机转子、定子刚体，同步电机转子、定子杠杆，弹簧等的机械模型。

2、利用本发明测量同步电机运行状态而绘制的同步电机复合功角图较电气矢量图增加了同步电机的机械模型图，并添加了  $E_qM$ 、 $E_dN$  辅助线，较原矢量图可以更易看出同步电机的功率分配，定子电压有功、无功分量，定子电流有功、无功分量和弹簧拉力的有功和无功分量；还可显示励磁调节信号变化量的大小。

3、利用本发明复合功角仪测量电机运行状态而绘制的电机运行状态图形有利于各种专业运行人员从电气、机械两方面辨证理解同步电机工作的原理，为机械化分析同步电机并网运

行状态提供了直观模型，可以作为同步电机励磁特性分析、励磁调试、同期并网、运行监视和控制等工作的有效工具。

4、利用本发明绘制的同步电机同期功角图可以用于同步电机同期并网监视用。

5、利用本发明绘制的同步电机端部合成漏磁图可以分析和监视同步电机端部发热状况。

#### 附图说明

图 1 为本发明复合功角仪结构示意图；

图 2 为本发明复合功角仪外部连接关系图；

图 3 为本发明复合功角仪 I/V 转换回路的工作原理图；

图 4 为本发明复合功角仪数据采集部分具体电路图；

图 5 为利用本发明复合功角仪测量凸极同步电机运行状态绘制的复合功角图；

图 6 为利用本发明复合功角仪测量凸极同步电机运行状态绘制的复合功角分图 I --- 电气功角矢量图；

图 7 为利用本发明复合功角仪测量凸极同步电机运行状态绘制的复合功角分图 II --- 电机机械模型图；

图 8 为利用本发明复合功角仪测量凸极同步电机运行状态绘制的复合功角分图 III --- 电机机械模型简图；

图 9 为利用本发明复合功角仪测量凸极同步电机运行状态绘制的复合功角分图 IV --- 同期复合功角图；

图 10 为利用本发明复合功角仪测量凸极同步电机运行状态建立的凸极同步电机功角图形的坐标模型；

图 11 为同步电机数字标识显示画面；

图 12 为绘制的发电机空载和零功率因数曲线；

图 13 为绘制的发电机气隙电势与饱和电抗的关系曲线；

图 14 为利用本发明复合功角仪测量隐极同步电机运行状态绘制的复合功角图；

图 15 为利用本发明复合功角仪测量隐极同步电机运行状态绘制的复合功角分图 I --- 电气功角矢量图；

图 16 为利用本发明复合功角仪测量隐极同步电机运行状态绘制的复合功角分图 II --- 电机机械模型图；

图 17 为利用本发明复合功角仪测量隐极同步电机运行状态绘制的复合功角分图 III --- 电机机械模型简图；

图 18 为利用本发明复合功角仪测量隐极同步电机运行状态绘制的复合功角分图 IV——同期复合功角图；

图 19 为利用本发明复合功角仪测量隐极同步电机运行状态建立的隐极同步电机功角图形的坐标模型；

图 20 为利用本发明复合功角仪测量凸极同步电机运行状态绘制的机端合成漏磁图；

图 21 为利用本发明复合功角仪测量凸极同步电机运行状态建立的机端合成漏磁坐标模型；

图 22 为利用本发明复合功角仪测量隐极同步电机运行状态绘制的机端合成漏磁图；

图 23 为利用本发明复合功角仪测量隐极同步电机运行状态建立的机端合成漏磁坐标模型。

### 发明的最佳实施方式

如图 1 所示，本发明复合功角仪由数据采集部分 1 和计算机设备 2 构成。数据采集部分 1 包括电信号采集和数字信号采集，电信号采集有 I/V 转换回路和 AD 转换芯片，其功能是采集关于同步电机的各种电信号，并将电信号转换成数字信号，传输至计算机 2，数字信号采集是将有关设备的数字信号采集传输至计算机 2。计算机主机 2 内存储有图形显像程序和计算程序，计算机主机 2 根据获得的关于同步电机的有关参数按照计算程序演算，得出图形有关点的坐标及相关数据，再将结果输入显像程序，计算机利用主要点的坐标及运算结果，通过显像程序处理由计算机的显示器显示随电机参数变化而变化的表示同步电机运行状态的电气、机械模型图、动态复合功角图，显示同步电机的端部合成漏磁图，并实现报警功能。

如图 2 所示，本发明复合功角仪通过导线与电力系统中的测量装置相连，接收表 1 所列的同步电机和电力系统中测量装置（即变送器）输出的电信号，当电力系统可提供可用的数字信号时，可省去相应的电信号采集回路，通过数字信号采集获得相应参数。

表 1 电量变送器接收和输出的电信号

变送器	接收信号		输出信号
	信号来源	电信号	
直流电压 变送器	同步电机出口 TV1	机端三相线电压 $U_{AB} \quad U_{BC} \quad U_{CA}$	机端三相线电压 $u_{AB} \quad u_{BC} \quad u_{CA}$
	系统 TV2	系统三相线电压 $U_{XAB} \quad U_{XBC} \quad U_{XCA}$	系统三相线电压 $u_{XAB} \quad u_{XBC} \quad u_{XCA}$
	同步电机励磁机	励磁电压及其工、备励电压 $U_L \quad U_G \quad U_B$	励磁电压及其工、备励电压 $u_L$ $u_G \quad u_B$

	开关状态信号, 断开 低电位, 合闸高电位	励磁系统及同步电机出口开 关开断状态信号 $U_{ZG} \quad U_{ZB} \quad U_{DL}$	励磁系统及同步电机出口开 关开断状态信号 $u_{ZG} \quad u_{ZB} \quad u_{DL}$
	励磁机调节单元	励磁调节信号 $U_1 \quad U_2 \cdots U_n$	励磁调节信号 $u_1 \quad u_2 \cdots u_n$
直流电流 变送器	同步电机励磁机	励磁电流及其工、备励电流 $I_L \quad I_G \quad I_{BY}$	励磁电流及其工、备励 电流 $i_L \quad i_G \quad i_{BY}$
交流电压 变送器	同步电机出口 TV1	机端三相线电压 $U_{AB}$ $U_{BC} \quad U_{CA}$	机端三相线电压有效值 $U_{ab} \quad U_{bc} \quad U_{ca}$
	系统 TV2	系统三相线电压 $U_{XAB} \quad U_{XBC}$ $U_{XCA}$	系统三相线电压有效值 $U_{xab}$ $U_{xbc} \quad U_{xca}$
交流电流 变送器	同步电机出口 TA	机端三相电流 $I_A \quad I_B \quad I_C$	机端三相电流有效值 $I_a \quad I_b$ $I_c$
功率变送 器	同步电机出口 TV1	机端线电压 $U_{AB} \quad U_{BC} \quad U_{CA}$	同步电机有功功率 P
	同步电机出口 TA	机端电流 $I_A \quad I_B \quad I_C$	同步电机无功功率 Q
频率变送 器	同步电机出口 TV1	机端线电压 $U_{AB}$	机端电压频率 $f$
	系统 TV2	系统线电压 $U_{XAB}$	系统电压频率 $f_x$
负序电压 变送器	同步电机出口 TV1	机端三相线电压 $U_{AB} \quad U_{BC} \quad U_{CA}$	同步电机负序电压 $U_F$

复合功角仪电信号数据采集部分的工作主要分为三步:

- 1、通过各种电量变送器接收电机信号并将各信号转化为  $0 \sim \pm 20\text{mA}$  的模拟电流信号。
- 2、由 I/V 转换回路将电量变送器输出的电流信号转化为  $0 \sim \pm 5\text{V}$  的电压信号。
- 3、将  $0 \sim \pm 5\text{V}$  的电压信号接入数据采集接口卡, 经 A/D 转换为数字量而被送入微机内存。图 3 示出 I/V 转换回路的工作原理, 变送器输出的电流信号通过电阻  $R_1$ 、 $R_2$  时, 将  $R_2$  的  $0 \sim \pm 5\text{V}$  电压信号输送给 A/D 转换装置。
- 4、图 4 示出数据采集系统 A/D 转换装置工作原理图, 主要技术条件为:
  - a、需获取同一时刻机端电压、系统电压的瞬时值, 送入微机内存, 进行计算;  
即数据采集系统 A/D 转换装置需要将同一时刻的机端三相瞬时线电压  $u_{AB} \quad u_{BC} \quad u_{CA}$  和系统三相瞬时线电压  $u_{XAB} \quad u_{XBC} \quad u_{XCA}$  输入微机, 由微机对各组瞬时电压进行计算。
  - b、A/D 转换装置可以采集足够的信号, 多余的采集点可以作为临时增加采集量备用。

复合功角仪将输入复合功角仪的各种电信号, 由 A/D 芯片完成电信号的数据化转换, 并将数字化的各种信号通过串行口或并行口输入计算机主机, 由计算机主机将输入的信号进行

计算程序和显像程序的处理，绘制出表示同步电机运行状态的图形。

当可以从其它设备获取需要的计算量时，其电量采集回路、计算程序可以省去。

利用本发明复合功角仪测量同步电机运行状态的方法是：

1、获取同步电机定子电压、电流信号，励磁电压、电流信号，励磁调节信号，系统电压、电流信号，同步电机出口开关及其励磁回路开关状态信号；

2、通过数据采集部分接收有关数字信号和电信号，并完成电信号的数据化转换，将所得数字信号输入计算机主机；

3、利用键盘和鼠标向计算机主机输入相关参数或命令；

4、计算机主机对电机的有关运行参数进行运算，对相关数据进行计算程序处理；经过程序处理，将得到的数据进入显像程序，确定主要点的瞬时坐标；

5、计算机主机利用主要点的坐标，通过显像程序处理，绘制同步电机的各种电气和机械模型图，由显示器显示随电机参数变化而变化的同步电机动态复合功角图、同步电机的端部合成漏磁图。

由于同步电机按电机转子形状不同分为凸极同步电机和隐极同步电机两大类，所以，同步电机复合功角仪按电机种类也分为凸极同步电机复合功角仪和隐极同步电机复合功角仪。

下面结合不同类型的同步电机，详细描述利用复合功角仪如何测量不同类型电机的方法。

(一) 利用复合功角仪测量凸极同步电机运行状态的方法：

1、通过复合功角仪外部接线，获取同步电机定子电压、电流信号，励磁电压、电流信号，励磁调节信号，系统电压信号，同步电机出口开关及其励磁回路开关状态信号。

2、通过复合功角仪的数据采集部分 A/D 转换芯片将上述有关的电信号转换成数字信号，这种通过芯片转换的数字信号连同接收的数字信号通过串口或并口输入到计算机主机，由微机将输入的信号进行程序处理。

3、利用键盘和鼠标向计算机主机输入相关参数或命令。

4、利用计算机主机对上述数据进行程序处理。

所述程序处理包括显像程序和计算程序两部分，要点如下：

1) 显像程序要点

① 建立图像坐标

凸极同步电机复合功角仪共显示六种图形，它们分别是凸极同步电机复合功角图，如图 5 所示；凸极同步电机复合功角图分图 I—电气功角矢量图，如图 6 所示；凸极同步电机复合功角图分图 II—电机机械模型图，如图 7 所示；凸极同步电机复合功角图分图 III—电机机械模型简图，如图 8 所示；凸极同步电机复合功角图分图 IV—同期复合功角图，如图 9 所示；



凸极同步电机机端合成漏磁图，如图 20 所示。根据图 5、图 6、图 7、图 8、图 9，利用待求数据建立坐标模型，如图 10 所示。根据图 20，利用待求数据建立坐标模型，如图 21 所示。

图 5 坐标点字母右下角用 0 表示，图 6 坐标点字母右下角用 1 表示，图 7 坐标点字母右下角用 2 和 3 表示，图 8 坐标点字母右下角用 4 表示，图 9 坐标点字母右下角用 5 表示，图 20 坐标点字母右下角用 20 表示。各点坐标待求量表示如下：

图 5:  $A_0(a, b)$   $B_0(c, d)$   $C_0(e, 0)$   $D_0(0, 0)$   $E_0(f, g)$   $F_0(f, 0)$   $G_0(c, 0)$

图 6:  $A_1(a, b)$   $C_1(e, 0)$   $D_1(0, 0)$   $E_1(f, g)$

图 7:  $A_2(\frac{a}{2}, \frac{b}{2})$   $B_2(\frac{c}{2}, \frac{d}{2})$   $C_2(\frac{e}{2}, 0)$   $D_2(0, 0)$   $E_2(\frac{f}{2}, \frac{g}{2})$   
 $A_3(-\frac{a}{2}, -\frac{b}{2})$   $B_3(-\frac{c}{2}, -\frac{d}{2})$   $C_3(-\frac{e}{2}, 0)$   $E_3(-\frac{f}{2}, -\frac{g}{2})$

图 8:  $A_4(a, b)$   $B_4(c, d)$   $C_4(e, 0)$   $D_4(0, 0)$   $E_4(f, g)$

图 9:  $A_5(h, i)$   $C_5(j, 0)$   $D_5(0, 0)$

图 20:  $T_{20}(0, 0)$   $X_{20}(X_1, Y_1)$   $Y_{20}(X_2, Y_2)$   $Z_{20}(X_3, Y_3)$

其中，图 6 所示为电机学范畴所指的凸极同步电机功角矢量图，点  $A_0(a, b)$ 、 $A_1(a, b)$ 、 $A_4(a, b)$  与图 6 所示的同步电机励磁电势  $\dot{E}_0$  矢量顶点的平面坐标相同；点  $C_0(e, 0)$ 、 $C_1(e, 0)$ 、 $C_4(e, 0)$  与图 6 所示的同步电机机端电压  $\dot{U}$  矢量顶点的平面坐标相同；点  $D_0(0, 0)$ 、 $D_1(0, 0)$ 、 $D_2(0, 0)$ 、 $D_4(0, 0)$  与图 6 所示的同步电机功角矢量顶点 0 的平面坐标相同；点  $A_2(\frac{a}{2}, \frac{b}{2})$  坐标值是图 6 所示的同步电机励磁电势  $\dot{E}_0$  矢量顶点的平面坐标的值一半；点  $C_2(\frac{e}{2}, 0)$  坐标值是图 6 所示同步电机机端电压  $\dot{U}$  矢量顶点的平面坐标值的一半；点  $A_5$  距点  $D_5$  的距离为同期时同步电机的机端电压，点  $C_5$  距点  $D_5$  的距离为同期时系统电压，图 9 所示  $\delta$  角为同期时同步电机电压与系统电压之间的相角差。

## ② 成像要点

a) 各图的坐标点只和本图组合，只在本图成像，图像平滑移动，当同步电机定子电流不等于零时图 5 图像取代图 9 图像。

b) 同步电机转子刚体轴心：分别以点  $D_0$   $D_2$   $D_4$   $D_5$  为圆心，以同步电机额定工作时  $C_0D_0$  线段的  $\frac{1}{20}$  长度为半径画圆，圆为白色。

c) 同步电机转子刚体：分别以点  $D_0$   $D_2$   $D_4$   $D_5$  为圆心，以同步电机额定工作时  $C_0D_0$  线段的  $\frac{1}{4}$  长度为半径画圆，转子刚体圆与转子刚体轴心圆相交部分仍为白色，其余用深蓝色表示。

d) 同步电机转子杠杆：杠杆为深蓝色（与转子刚体同色），线粗与轴心圆的直径相同，转子杠杆为 T 形杠杆时，图 5、图 8、图 9 的 T 形杠杆的顶部横杆长度是同步电机额定运行时

$D_0C_0$  线段的两倍且居中, 杠杆与转子轴心相交部分仍为白色, 图 7 中的 T 形杠杆的顶部横杆长度是同步电机额定运行时  $D_2C_2$  长度的两倍且居中, 杠杆与转子轴心相交部分仍为白色。顶部横杆的二分之一长度不得小于各自图中线段  $C_0E_0$ 、 $C_2E_2$ 、 $C_4E_4$  长度。

点  $D_0$  与点  $A_0$  之间, 点  $A_3$  与点  $A_2$  之间, 点  $D_4$  与点  $A_4$  之间, 点  $D_5$  与点  $A_5$  之间用杠杆连接。

e) 定子刚体: 以点  $D_2$  为圆心, 以同步电机额定工作时  $C_0D_0$  线段的  $\frac{1}{2}$  长度为半径画圆, 此圆和转子刚体圆, 转子轴心圆及转子杠杆重合之外的部分, 用浅灰色表示。

在点  $C_0$  与点  $D_0$ , 点  $C_4$  与点  $D_4$ , 点  $C_5$  与点  $D_5$  之间分别用细实线连接, 两侧各延长同步电机额定工作时  $C_0D_0$  线段的  $\frac{1}{2}$  长度, 与转子刚体圆、转子轴心圆相交部分用虚线表示, 线下方用平行的细短斜线作阴影标记, 转子刚体圆、转子轴心圆部分不作阴影标记。

f) 定子杠杆: 点  $C_2$  点  $C_3$  之间用定子杠杆表示, 定子杠杆粗细与转子杠杆同, 颜色与定子刚体圆同, 与转子刚体圆, 轴心圆相交部分仍显示转子刚体圆及轴心圆的颜色。

点  $C_0$  与点  $D_0$ , 点  $C_4$  与点  $D_4$ , 点  $C_5$  与点  $D_5$  之间用黑粗线连接表示杠杆, 线粗为轴心圆半径, 与转子轴心圆、转子刚体圆相交部分用细虚线表示。

g) 弹簧: 黑色, 形象逼真, 随着弹簧的伸长和缩短, 有拉伸和收缩的视觉, 弹簧与杠杆之间应有明显的连接点。

点  $B_0$  与点  $C_0$  点之间, 点  $E_0$  与点  $C_0$  点之间, 点  $B_2$  与点  $C_2$  之间, 点  $E_2$  与点  $C_2$  之间, 点  $B_3$  与点  $C_3$  之间, 点  $E_3$  与点  $C_3$  之间, 点  $B_4$  与点  $C_4$  点  $E_4$  与点  $C_4$  之间之间弹簧连接。

h) 弹簧与杠杆之间的连接点: 用白色圆表示, 圆的直径略小于杠杆直径, 居杠杆和弹簧轴心, 和弹簧之间有明显的连接视觉。杠杆顶端表示连接点的圆的圆心距杠杆两边的距离等于距杠杆端部的距离。

i) 线段: 点  $E_0$  与点  $F_0$ , 点  $B_0$  与点  $G_0$  点, 点  $C_0$  与点  $G_0$ , 用细黑线连接。

j) 矢量: 点  $D_1$  和点  $A_1$  之间, 用带一个箭头的线段表示, 箭头指向点  $A_1$ ; 点  $E_1$  和点  $A_1$  之间, 用带一个箭头的线段表示, 箭头指向点  $A_1$ ; 点  $C_1$  和点  $E_1$  之间, 用带一个箭头的线段表示, 箭头指向点  $E_1$ ; 点  $D_1$  和点  $C_1$  之间, 用带一个箭头的线段表示, 箭头指向点  $C_1$ 。线段  $E_1A_1$  在线段  $D_1A_1$  的下方。点  $T_{20}$  与点  $X_{20}$  之间用黑色带箭头的粗线段表示, 箭头指向点  $X_{20}$ ; 点  $T_{20}$  与点  $Y_{20}$  之间用黑色带箭头的粗线段表示, 箭头指向点  $Y_{20}$ ; 点  $T_{20}$  与点  $Z_{20}$  之间用彩色带箭头的粗线段表示, 箭头指向点  $Z_{20}$ ; 点  $X_{20}$  与点  $Z_{20}$ 、 $Y_{20}$  与点  $Z_{20}$  之间用黑色细虚线段表示。

k) 坐标点的标识:

点  $A_0$  标 " $E_0$ ", 点  $B_0$  标 " $E_d$ ", 点  $C_0$  标 " $U$ ", 点  $D_0$  标 " $O$ ", 点  $E_0$  标 " $E_q$ ", 点  $F_0$  标 " $M$ ", 点  $G_0$  标 " $N$ ";

点  $A_1$  上部标 " $\dot{E}_0$ ", 下部标 " $\dot{E}_d$ ", 点  $C_1$  标 " $\dot{U}$ ", 点  $D_1$  标 " $O$ ", 点  $E_1$  标 " $\dot{E}_q$ ";

点  $A_2$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_2$ ”, 点  $B_2$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_2$ ”, 点  $C_2$  标 “ $\Sigma\Sigma\dot{\Phi}$ ”, 点  $D_2$  标 “0”, 点  $E_2$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_q$ ”  
 点  $A_4$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_0$ ”, 点  $B_4$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_q$ ”, 点  $C_4$  标 “ $\Sigma\Sigma\dot{\Phi}$ ”, 点  $D_4$  标 “0”, 点  $E_4$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_q$ ”  
 点  $A_5$  标 “ $E_0$ ”, 点  $C_5$  标 “U”, 点  $D_5$  标 “0”  
 点  $X_{20}$ 、 $Y_{20}$ 、 $Z_{20}$  分别标为  $\Sigma\dot{\Phi}_{00}$ 、 $\Sigma\dot{\Phi}_{q0}$ 、 $\Sigma\dot{\Phi}_{D0}$

标识随着坐标点的位置的移动而移动, 各标识与对应的作标点的相对位置保持不变。

1) 功角标识: 表示功角的虚线通转子中心, 与杠杆轴心重合, 长不大于同步电机额定工作时  $C_0D_0$  线段长度的三分之一。在功角范围内标 “ $\delta$ ”, 功角两侧杠杆之间用圆弧连接, 且圆弧顶点随杠杆的位置变化而变化, 圆弧半径大于转子刚体圆的半径, 圆弧圆心与定子轴心重合。

m) 励磁调节信号标识:

两种方法:

(a) 根据突变量算法, 按  $\Delta E_0$  所占现在励磁电势百分长度, 当  $\Delta E_0$  大于某一给定值时显示励磁电势突变量, 当  $\Delta E_0$  为正值时, 由励磁杠杆顶部向转子轴心排列,  $\Delta E_0$  为负值时由转子轴心延励磁电势反方向排列。在图 5 的显示屏幕上标识各调节信号及其颜色。

(b) 根据调节量算法, 计算机计算的结果, 按  $E_{01}$ 、 $E_{02}$ 、……、 $E_{0n}$  值, 将各调节量以不同的颜色, 按所占百分长度, 调增信号依次由励磁杠杆顶部向转子轴心紧密排列, 调减信号则由转子轴心顺次延励磁电势反方向直线紧密排列, 如图 5 所示。在图 5 的显示屏幕上标识各调节信号及其颜色。

n) PQ 曲线标识: 在图 10 中, 根据同步电机端部发热极限、系统允许同步电机最大运行功角确定点  $M_0$  至点  $N_0$  的曲线, 根据同步电机允许最大有功功率确定  $N_0O_0$  曲线, 根据同步电机允许的最大定子磁通量、最大定子电流、最大定子电势确定  $O_0P_0$  曲线, 根据同步电机允许的最大转子磁通量、最大转子电流、最大转子电压确定  $P_0Q_0$  曲线。点  $M_0$ 、点  $Q_0$  均在  $D_0G_0$  直线上, 点  $G_0$ 、点  $Q_0$  之间用细直线连接。曲线  $M_0N_0O_0P_0Q_0$  (不含直线段  $M_0Q_0$ ) 用粗实线连接, 颜色根据用户要求定。

o) 合成漏磁图报警圆: 以点  $T_{20}$  为原点、以同步电机最大允许漏磁通量为半径画圆, 此圆为报警圆, 用粗彩线表示。

P) 同期图象要求: 以点  $D_5$  为圆心, 分别以线段  $D_5A_5$ 、 $D_5C_5$  为半径画虚线圆。当  $\frac{d\delta}{dt}$  足够大, 分辨不出  $D_5A_5$  杠杆的位置时, 电机转子刚体之外的杠杆扫描部分, 用雾状浅蓝色覆盖; 当  $\frac{d\delta}{dt}$  足够小, 可以分辨出杠杆  $D_5A_5$  的位置时, 用图 9 所示的图形表示。

Q) 图 7 所示的机械模型可以动态逆时针旋转, 屏面标识模型转速与实物转速的比值, 转速比可以选择。

R) 图形报警显示: 各电气量或磁通量报警时, 标识变红色闪光, 微机喇叭响, 复合功角

图及其分图画面相应线段变红色闪光，解除报警时报警标识或线段变红色不闪光。各种量报警时，图 10 所示的对应报警线段参见表 2，并使相应的复合功角图或其分图对应的图形闪红色光报警，解除报警时报警图形变红色不闪光。用鼠标点击某参数时，图 10 所示的对应线段显示报警颜色，参见表 2，并使相应的复合功角图及其分图对应的图形变红色。漏磁报警时线段  $T_{20}Z_{20}$  变红色，标示  $\Sigma\Phi_{D0}$  变红色。

表 2 凸极同步电机复合功角图报警表

报警量	复合功角图	复合功角图分图 I	复合功角图分图 II	复合功角图分图 III	复合功角图分图 IV
同步电机机端电压 $U_{ab} U_{bc} U_{ca}$	$D_0C_0$	$D_1C_1$			$D_5A_5$ (T 型杠杆)
同步电机定子合成磁通量	$D_0C_0$		$C_2C_3$	$D_4C_4$	$D_5A_5$ (T 型杠杆)
同步电机励磁电压及电流 $u_f, i_f$	$D_0A_0$ (T 型杠杆)	$D_1A_1$			$D_5A_5$ (T 型杠杆)
同步电机转子磁通量	$D_0A_0$ (T 型杠杆)		$A_2A_3$ (工字型杠杆)	$D_4A_4$ (T 型杠杆)	$D_5A_5$ (T 型杠杆)
系统电压 $U_{xab} U_{xbc} U_{xca}$					$D_5C_5$
同步电机定子电流 $I_a I_b I_c$	$E_0C_0$ 及 $C_0B_0$				
同步电机有功 P	$E_0F_0$ 及 $B_0G_0$				
同步电机无功 Q	$F_0 C_0$ 及 $C_0G_0$				

S) 数字标识显示画面：做如图 11 所示的电机一次图形，并标识所示字母，在字母后显示相应的数字量，且可以进行实际值和标么值切换，报警时标识及数字变红色闪光，微机喇叭响，解除报警后变红色不闪光。标识和数字显示的条件：

(a) 当同步电机并网后，即电机出口断路器 DL 合闸时，此时电机出口断路器 DL 的状态信号  $U_{DL}$  高电位，电机出口断路器 DL 变蓝色，数字显示画面不显示系统侧的电压 ( $U_{xab} U_{xbc} U_{xca}$ ) 及频率 ( $f_x$ ) 的字母标识和数字，显示其它标识和数字。

(b) 当同步电机解列或并网期间，即电机出口断路器 DL 分闸时，此时电机出口断路器 DL 的状态信号  $U_{DL}$  低电位，电机出口断路器 DL 标识白色，显示所有标识和数字。

(c) 同步电机工励或备励开关接通时，其状态信号  $U_{zg}$  或  $U_{zn}$  高电位，相应开关变蓝色；励磁开关断开时其状态信号  $U_{zg}$  或  $U_{zn}$  低电位，相应开关标识白色。

(e) 同步电机出口断路器 DL 分闸时, 令同步电机转子磁通量  $\Sigma\Phi_0$  的数字显示值与定子总磁通量  $\Sigma\Sigma\Phi$  的值相等。同步电机出口断路器 DL 合闸时, 按计算值显示电机转子磁通量  $\Sigma\Phi_0$  的数值。

按上述显像要求, 经程序处理可得到图 5、图 6、图 7、图 8、图 9、图 20 所示的六种图形, 这六种图形之间可以根据使用方要求组合, 任一组合画面可以和数字显示画面图 11 组合。可以小范围调整给定的图 5、图 7、图 8、图 9 中的同步电机定子、转子半径, 定子、转子轴心半径, 杠杆粗细, 弹簧连接点半径的大小; 可以将图 5、图 7、图 8、图 9 所示的模型制作成各种三维立体机械模型; 可以根据用户要求调整模型颜色。

## 2) 计算程序要点

### (1) 确定参数

给定参数: 电机定子漏抗  $X_\sigma$  (保梯电抗), 交轴同步电抗  $X_q$ , 同步电机电压、电流、频率折算系数  $K_U$ 、 $K_I$ 、 $K_\omega$ , 系统电压、频率折算系数  $K_{XU}$ 、 $K_{X\omega}$ , 有功、无功功率折算系数  $K_P$ 、 $K_Q$ 、 $K_m$ , 同步电机励磁电压及工备励电压折算系数  $K_L$   $K_{GL}$   $K_{BL}$ , 同步电机励磁电流及工、备励电流折算系数  $K_f$ 、 $K_{Gf}$ 、 $K_{Bf}$ , 负序电压折算系数  $K_F$ , 同步电机机端电压同期折算系数  $K_T$ 、 $K_N$ , 系统电压同期折算系数  $K_{XT}$ 、 $K_{XN}$ , 励磁调节信号电压折算系数  $K_{TV}$ , 漏磁通系数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 。主要参数允许范围: 主要参数包括电机机端电压、定子电流、励磁电压、励磁电流、有功功率、无功功率、定子磁通量、转子磁通量、功角、系统电压等。电机额定参数, 主要包括: 电机机端电压、定子电流、励磁电压、励磁电流、有功功率、无功功率、定子磁通量、转子磁通量、系统电压等。

### (2) 参数计算:

$$\begin{array}{lll}
 \text{a} & P_j = K_P P & \Sigma P = K_m P_j \\
 \text{b} & Q_j = K_Q Q & \Sigma Q = K_m Q_j \\
 \text{c} & I_{aj} = K_I I_a & I_{bj} = K_I I_b & I_{cj} = K_I I_c \\
 \text{d} & U_{abj} = K_U U_{ab} & U_{bcj} = K_U U_{bc} & U_{caj} = K_U U_{ca} \\
 \text{e} & I_f = K_f i_L & I_{Gf} = K_{Gf} i_G & I_{Bf} = K_{Bf} i_{BY} \\
 \text{f} & F = K_\omega f & F_X = K_{X\omega} f_X \\
 \text{g} & U_{Fj} = K_F U_F \\
 \text{h} & U_{xabj} = K_{XU} U_{xab} & U_{xbcj} = K_{XU} U_{xbc} & U_{xcnj} = K_{XU} U_{xcn} \\
 \text{i} & u_{Lj} = K_L u_L & u_{Gj} = K_{GL} u_G & u_{Bj} = K_{BL} u_B
 \end{array}$$

### (3) 确定凸极同步电机直轴同步电抗 $X_d$ 值

确定凸极同步电机直轴同步电抗  $X_d$  值的两种方法:

a、根据同步电机通常工作时气隙电势  $E_s$  的值直接给定直轴同步电抗  $X_d$  值,  $X_d$  值不变。

b、根据同步电机气隙电势  $E_s$  与直轴同步电抗  $X_d$  的函数关系, 由  $E_s$  值确定  $X_d$  值

a) 录制图 12 所示的发电机空载 ( $I_a = 0$ ) 和零功率因数 ( $I_a = I_N$ ) 曲线, 即  $U = f_0(I_f)$  和  $U = f_N(I_f)$  曲线。

b) 确定同步电机气隙电势  $E_s$  与直轴同步电抗  $X_d$  的函数关系

根据  $U = f_0(I_f)$  和  $U = f_N(I_f)$  曲线图, 取  $I_{f1}$   $I_{f2}$   $\cdots$   $I_{fn}$   $n$  个励磁电流值, 由零功率因数曲线确定

$U = f_N(I_f)$  曲线上的与  $I_{f1}$   $I_{f2}$   $\cdots$   $I_{fn}$  对应的点  $B_1$   $B_2$   $\cdots$   $B_n$ , 过点  $B_1$   $B_2$   $\cdots$   $B_n$  分别作  $n$  个全等特性三角形 (其中  $CD$  垂直于横坐标,  $CD = I_N * X_\sigma$ ), 分别交空载特性曲线  $U = f_0(I_f)$  于点  $C$   $C_1$   $C_2$   $\cdots$   $C_n$ , 连接点  $O$  和点  $C_1$ , 并延长  $OC_1$  交过点  $B_1$  平行于纵坐标轴的直线于点  $A_1$ , 同理连接点  $O$  和点  $C_2$ 、 $\cdots$  连接点  $O$  和点  $C_n$ , 并延长  $OC_2$   $\cdots$  延长  $OC_n$ , 与平行于纵坐标轴的分别过点  $B_2$   $\cdots$   $B_n$  的直线交于点  $A_2$   $\cdots$   $A_n$ 。

则  $E_{s1}$   $E_{s2}$   $\cdots$   $E_{sn}$  所对应的同步饱和电抗分别为:  $X_{d1} = \frac{A_1 B_1}{I_N}$ ,  $X_{d2} = \frac{A_2 B_2}{I_N}$   $\cdots$   $X_{dn} = \frac{A_n B_n}{I_N}$ , 根据  $E_{s1}$ ,  $E_{s2}$   $\cdots$   $E_{sn}$  一一对应的同步饱和电抗  $X_{d1}$ ,  $X_{d2}$   $\cdots$   $X_{dn}$  的关系绘制气隙电势与饱和电抗的关系图, 如图 13 所示, 由此曲线确定  $X_d = f(E_s)$  函数。

c) 求  $E_s$

$$\dot{W} = P_j + jQ_j = W \angle \varphi; \quad \dot{U}_a = \frac{U_{ny}}{\sqrt{3}} = e;$$

$$\text{则 } \dot{I}_{aj} = I_{aj} \angle (-\varphi),$$

$$\dot{E}_s = e + j\dot{I}_{aj} * X_\sigma; \quad E_s = |\dot{E}_s|$$

d) 将  $E_s$  值代入  $X_d = f(E_s)$  函数, 得  $X_d$  值

(4) 计算

$$a \quad \dot{H} = e + j\dot{I}_{aj} * X_q = H \angle \delta \quad \text{由此式确定 } \delta (90^\circ > \delta > -90^\circ)$$

$$b \quad I_d = I_{aj} \sin(\delta + \varphi)$$

$$c \quad I_q = I_{aj} \cos(\delta + \varphi)$$

$$d \quad a = (e * \cos \delta + I_d * X_d) * \cos \delta$$

$$e \quad b = (e * \cos \delta + I_d * X_d) * \sin \delta$$

$$f \quad c = e + I_d * X_d * \cos \delta$$

$$g \quad d = I_d * X_d * \sin \delta$$

$$h \quad f = e * \cos^2 \delta$$

$$i \quad g = \frac{1}{2} e * \sin 2\delta$$

j 励磁分量计算

两种计算方法:

(a) 突变量算法

设从某一时刻到现在的时间  $\Delta T$  内同步电机平均励磁电势为  $\Sigma E_0$ , 现在励磁电势为  $E_0$ , 设  $\Delta E_0 = E_0 - \Sigma E_0$ ,  $\Delta T$  值和采集励磁电势的次数可以设定。

(b) 调节量算法

设综合放大器自动励磁调节总量为  $\Sigma U$ , 各分量分别为:  $\Delta U = K_{TJ} U_1$   $U' = K_{TJ} U_2$   
 $\Delta f = K_{TJ} U_3 \dots X = K_{TJ} U_n$ ;  $\Sigma U = K_{TJ} (U_1 + U_2 + \dots + U_n)$ ,  $f_1 = \frac{K_{TJ} U_1}{\Sigma U}$   $f_2 = \frac{K_{TJ} U_2}{\Sigma U} \dots f_n = \frac{K_{TJ} U_n}{\Sigma U}$   
 计算  $E_{01} = f_1 \sqrt{a^2 + b^2}$   $E_{02} = f_2 \sqrt{a^2 + b^2} \dots E_{0n} = f_n \sqrt{a^2 + b^2}$

k 漏磁通量坐标计算

$X_1 = K_1 a$ ;  $Y_1 = K_1 b$ ;  $X_2 = K_2 (f - a) + K_3 (r - a)$ ;  $Y_2 = K_2 (g - b) + K_3 (d - b)$ ;  $X_3 = X_1 + X_2$ ;  $Y_3 = Y_1 + Y_2$

l 磁通量标么值计算: 设同步电动机某磁通量在频率为额定值时, 磁通量标么值与相应电压标么值相同, 根据频率、电压、磁通量的关系, 确定电机励磁磁通、定子总磁通的标么值, 并用数字显示, 将计算值于给定值比较, 当大于规定值时报警。

m 根据需要计算各量标么值。

(5) 当同期并网或解列时, 既  $I_a = I_b = I_c = 0$  时, 将输入微机的各组同步电机电压与系统电压量进行下列计算

$$a \quad \dot{U} = K_T (u_{AB} + u_{BC} \angle 120^\circ + u_{CA} \angle 240^\circ) = U \angle \alpha$$

$$b \quad \dot{U}_x = K_{XT} (u_{XAB} + u_{XBC} \angle 120^\circ + u_{XCA} \angle 240^\circ) = U_x \angle \varepsilon$$

$$d \quad \frac{\dot{U}}{\dot{U}_x} = \frac{U}{U_x} \angle \delta_x$$

e  $\bar{\delta}_x = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{n}$  (其中  $\delta_1 \delta_2 \dots \delta_n$  为一定时间内测得的第一、第二...第  $n$  个  $\delta_x$  的值, 且下一个测量值进入时, 舍去第一个  $\delta_1$  值, 再下一个测量值进入时, 舍去第二个  $\delta_2$  值, 以此类推进行新旧更换, 时间长短及  $n$  值可以设定)

$$f \quad h = K_N U_{abf} * \cos \bar{\delta}_x$$

$$g \quad i = K_N U_{abf} * \sin \bar{\delta}_x$$

$$h \quad j = K_{NN} U_{xabf}$$

(6) 将各种电气量于给定值比较, 当大于规定范围时报警。

(二) 利用隐极复合功角仪测量隐极同步电机运行状态的方法:

1、通过复合功角仪外部接线, 获取同步电机定子电压、电流信号, 励磁电压、电流信号, 励磁调节信号, 系统电压信号, 同步电机出口开关及其励磁回路开关状态信号。

2、通过复合功角仪的数据采集部分 A/D 转换芯片将上述有关的电信号转换成数字信号, 这种通过芯片转换的数字信号连同接收的数字信号通过串口或并口输入到计算机主机, 由微

机将输入的信号进行程序处理。

3、利用键盘和鼠标向计算机主机输入相关参数或命令；

4、利用计算机主机对上述数据进行程序处理；

所述程序处理包括显像程序和计算程序两部分，要点如下

1) 显像程序要点

① 建立图像坐标

隐极同步电机复合功角仪共显示五种图形，它们分别是隐极同步电机复合功角，见图 14；隐极同步电机复合功角分图 I—电气功角矢量图，见图 15；隐极同步电机复合功角分图 II—电机机械模型，见图 16；隐极同步电机复合功角分图 III—电机机械模型简图，见图 17；隐极同步电机复合功角分图 IV—同期复合功角图，见图 18；隐极同步电机机端合成漏磁图，如图 22 所示。根据各图共同特点，利用待求数据建立坐标模型，如图 19 所示，根据图 22 的特点，利用待求数据建立坐标模型，如图 23 所示。图 14 坐标点字母右下角用 10 表示，图 15 坐标点字母右下角用 11 表示，图 16 坐标点字母右下角用 12 和 13 表示，图 17 坐标点字母右下角用 14 表示，图 18 坐标点字母右下角用 15 表示，图 22 坐标点字母右下角用 22 表示，各点坐标用待求量表示如下：

图 14:	$A_{10} (a, b)$	$C_{10} (e, 0)$	$D_{10} (0, 0)$	$G_{10} (a, 0)$
图 15:	$A_{11} (a, b)$	$C_{11} (e, 0)$	$D_{11} (0, 0)$	
图 16:	$A_{12} (\frac{a}{2}, \frac{b}{2})$	$C_{12} (\frac{e}{2}, 0)$	$D_{12} (0, 0)$	
	$A_{13} (-\frac{a}{2}, -\frac{b}{2})$	$C_{13} (-\frac{e}{2}, 0)$		
图 17:	$A_{14} (a, b)$	$C_{14} (e, 0)$	$D_{14} (0, 0)$	
图 18:	$A_{15} (h, i)$	$C_{15} (j, 0)$	$D_{15} (0, 0)$	
图 22:	$T_{22} (0, 0)$	$X_{22} (X_1, Y_1)$	$Y_{22} (X_2, Y_2)$	$Z_{22} (X_3, Y_3)$

其中，图 15 所示为电机学范畴所指的隐极同步电机功角矢量图，点  $A_{10} (a, b)$ 、 $A_{11} (a, b)$ 、 $A_{14} (a, b)$  与图 15 所示的同步电机励磁电势  $\dot{E}_0$  矢量顶点的平面坐标相同；点  $C_{10} (e, 0)$ 、 $C_{11} (e, 0)$ 、 $C_{14} (e, 0)$  与图 15 所示的同步电机机端电压  $\dot{U}$  矢量顶点的平面坐标相同；点  $D_{10} (0, 0)$ 、 $D_{11} (0, 0)$ 、 $D_{12} (0, 0)$ 、 $D_{14} (0, 0)$  与图 15 所示的同步电机功角矢量顶点 0 的平面坐标相同；点  $A_{12} (\frac{a}{2}, \frac{b}{2})$  坐标值是图 15 所示的同步电机励磁电势  $\dot{E}_0$  矢量顶点的平面坐标的值一半；点  $C_{12} (\frac{e}{2}, 0)$  坐标值是图 15 所示同步电机机端电压  $\dot{U}$  矢量顶点的平面坐标值的一半；点  $A_{15}$  距点  $D_{15}$  的距离为同期时同步电机的机端电压，点  $C_{15}$  距点  $D_{15}$  的距离为同期时系统电压，图 18 所示  $\delta$  角为同期时同步电机电压与系统电压之间的相角差。



## ② 成像要点

a) 各图的坐标点只和本图组合, 只在本图成像, 图像平滑移动, 当同步电机定子电流不等于零时图 14 图像取代图 18 图像。

b) 同步电机转子刚体轴心: 分别以点  $D_{10}$   $D_{12}$   $D_{14}$   $D_{15}$  为圆心, 以同步电机额定工作时  $C_{10}D_{10}$  线段的  $\frac{1}{20}$  长度为半径画圆, 圆为白色。

c) 同步电机转子刚体: 分别以点  $D_{10}$   $D_{12}$   $D_{14}$   $D_{15}$  为圆心, 以同步电机额定工作时  $C_{10}D_{10}$  线段的  $\frac{1}{5}$  长度为半径画圆, 转子刚体圆与转子刚体轴心圆相交部分仍为白色, 其余用深蓝色表示。

d) 同步电机转子杠杆: 杠杆为蓝色 (与转子刚体同色), 线粗与轴心圆的直径相同, 杠杆与转子轴心相交部分仍为白色。

点  $D_{10}$  与点  $A_{10}$  之间, 点  $A_{12}$  与点  $A_{13}$  之间, 点  $A_{14}$  与点  $D_{14}$  之间, 点  $A_{15}$  与点  $D_{15}$  之间用杠杆连接。

e) 定子刚体: 以点  $D_{12}$  为圆心, 以同步电机额定工作时  $C_{10}D_{10}$  线段的  $\frac{1}{3}$  长度为半径画圆, 此圆和转子刚体圆, 转子轴心圆及转子杠杆重合之外的部分, 用浅灰色表示。

在点  $C_{10}$  与点  $D_{10}$ , 点  $C_{14}$  与点  $D_{14}$ , 点  $C_{15}$  与点  $D_{15}$  之间分别用细实线连接, 两侧各延长同步电机额定工作时  $C_{10}D_{10}$  线段的  $\frac{1}{2}$  长度, 与转子刚体圆、转子轴心圆相交部分用虚线表示, 线下方用平行的细短斜线作阴影标记, 转子刚体圆、转子轴心圆部分不作阴影标记。

f) 定子杠杆: 点  $C_{12}$  点  $C_{13}$  之间用定子杠杆表示, 定子杠杆粗与转子杠杆同, 颜色与定子刚体同, 与转子刚体圆, 轴心圆相交部分仍显示转子刚体圆及轴心圆的颜色。

点  $C_{10}$  与点  $D_{10}$ , 点  $C_{14}$  与点  $D_{14}$ , 点  $C_{15}$  与点  $D_{15}$  之间用黑粗细线连接表示杠杆, 线粗为轴心圆半径, 与转子刚体圆、转子轴心圆相交部分用细虚线表示。

g) 弹簧: 黑色, 形象逼真, 随着弹簧的伸长和缩短, 有拉伸和收缩的视觉, 弹簧与杠杆之间应有明显的连接点。

点  $A_{10}$  与  $C_{10}$  点之间, 点  $A_{12}$  与点  $C_{12}$  之间, 点  $A_{13}$  与点  $C_{13}$  之间, 点  $A_{14}$  与点  $C_{14}$  之间弹簧连接。

h) 弹簧与杠杆之间的连接点: 用白色圆表示, 圆直径略小于杠杆直径, 居杠杆和弹簧轴心, 和弹簧之间有明显的连接视觉。杠杆顶端表示连接点的圆的圆心距杠杆两边的距离等于距杠杆端部的距离。

i) 线段: 点  $A_{10}$  点  $G_{10}$  点, 点  $C_{10}$  点  $G_{10}$ , 用细黑线连接。

j) 矢量: 点  $D_{11}$  和点  $A_{11}$  之间, 用带一个箭头的线段表示, 箭头指向点  $A_{11}$ ; 点  $D_{11}$  和点  $C_{11}$  之间, 用带一个箭头的线段表示, 箭头指向点  $C_{11}$ ; 点  $C_{11}$  和点  $A_{11}$  之间, 用带一个箭头的线段表示, 箭头指向点  $C_{11}$ 。点  $T_{22}$  与点  $X_{22}$  之间用黑色带箭头的粗线段表示, 箭头指向点  $X_{22}$ ; 点  $T_{22}$  与点  $Y_{22}$  之间用黑色带箭头的粗线段表示, 箭头指向点  $Y_{22}$ ; 点  $T_{22}$  与点  $Z_{22}$  之间用彩色带箭头

的粗线段表示, 箭头指向点  $Z_{22}$ ; 点  $X_{22}$  与点  $Z_{22}$ 、 $Y_{22}$  与点  $Z_{22}$  之间用黑色细虚线段表示。

k) 坐标点的标识:

点  $A_{10}$  标 “ $E_0$ ”, 点  $C_{10}$  标 “U”, 点  $D_{10}$  标 “O”, 点  $G_{10}$  标 “M”;

点  $A_{11}$  标 “ $\dot{E}_0$ ”, 点  $C_{11}$  标 “ $\dot{U}$ ”, 点  $D_{11}$  标 “O”; 线段  $A_{11} C_{11}$  标 “ $\dot{E}_a$ ”;

点  $A_{12}$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_0$ ”, 点  $C_{12}$  标 “ $\Sigma\Sigma\dot{\Phi}$ ”, 点  $D_{12}$  标 “O”;

点  $A_{14}$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_0$ ”, 点  $C_{14}$  标 “ $\Sigma\Sigma\dot{\Phi}$ ”, 点  $D_{14}$  标 “O”;

点  $A_{15}$  标 “ $E_0$ ”, 点  $C_{15}$  标 “U”, 点  $D_{15}$  标 “O”;

漏磁合成图标识: 点  $X_{22}$ 、 $Y_{22}$ 、 $Z_{22}$  分别标为  $\Sigma\dot{\Phi}_{00}$ 、 $\Sigma\dot{\Phi}_{a0}$ 、 $\Sigma\dot{\Phi}_{D0}$

标识随着坐标点的位置的移动而移动, 各标识与对应的作标点的相对位置保持不变。

1) 功角标识: 表示功角的虚线通转子中心, 与杠杆轴心重合, 长不大于同步电机额定工作时  $C_{10}D_{10}$  线段长度的三分之一. 在功角范围内标 “ $\delta$ ”, 功角两侧杠杆之间用圆弧连接, 且圆弧顶点随杠杆的位置变化而变化, 圆弧半径大于转子刚体圆的半径, 圆弧圆心与定子轴心重合。

m) 励磁调节信号标识:

两种方法:

(a) 根据突变量算法, 按  $\Delta E_0$  所占比励磁电势百分长度, 当  $\Delta E_0$  大于某一给定值时显示励磁电势突变量, 当  $\Delta E_0$  为正值时, 由励磁杠杆顶部向转子轴心排列,  $\Delta E_0$  为负值时由转子轴心延励磁电势反方向排列。在图 14 的显示屏幕上标识各调节信号及其颜色。

(b) 根据调节量算法, 根据计算机计算的结果, 按  $E_{01}$ 、 $E_{02}$ 、…… $E_{0n}$  值, 将各调节量以不同的颜色, 按所占百分长度, 调增信号依次由励磁杠杆顶部向转子轴心紧密排列, 调减信号则由转子轴心顺次延励磁电势反方直线紧密排列, 如图 14 所示。在图 14 显示屏幕上标识各调节信号的颜色。

n) 标识 PQ 曲线: 根据同步电机端部发热极限、系统允许同步电机最大运行功角确定点  $M_{10}$  至点  $N_{10}$  的曲线; 根据同步电机允许最大有功功率确定  $N_{10}O_{10}$  曲线, 根据同步电机允许的最大定子磁通量、最大定子电流、最大定子电势确定  $O_{10}P_{10}$  曲线, 根据同步电机允许的最大转子磁通量、最大转子电流、最大转子电压确定  $P_{10}Q_{10}$  曲线。点  $M_{10}$ 、点  $Q_{10}$  均在  $D_{10}G_{10}$  直线上, 点  $G_{10}$ 、点  $Q_{10}$  之间用细直线连接。曲线  $M_{10}N_{10}O_{10}P_{10}Q_{10}$  (不含直线段  $M_{10}Q_{10}$ ) 用粗实线连接, 颜色根据用户要求定。

o) 合成漏磁图报警圆: 以点  $T_{22}$  为原点、以同步电机最大允许漏磁通量为半径画圆, 此圆为报警圆, 用粗彩线表示。

p) 同期图象要求: 以点  $D_{15}$  为圆心, 分别以线段  $D_{15}A_{15}$ 、 $D_{15}C_{15}$  为半径画虚线圆。当  $\frac{d\delta}{dt}$  足够大, 分辨不出  $D_{15}A_{15}$  杠杆的位置时, 电机转子刚体之外的杠杆扫描部分, 用雾状浅蓝色覆盖;

当  $\frac{d\delta}{dt}$  足够小, 可以分辨出杠杆  $D_{15}A_{15}$  的位置时, 用图 18 所示的图形表示。

q) 图 16 所示的机械模型可以动态逆时针旋转, 屏面标识模型转速与实物转速的比值, 转速比可以选择。

r) 图形报警显示: 各电气量或磁通量报警时, 标识变红色闪光, 微机喇叭响, 复合功角图及其分图画面对应线段变红色闪光, 解除报警时报警标识及线段变红色不闪光。各种量报警时, 图 19 所示的对应报警线段参见表 3, 并使相应的复合功角图或其分图对应的图形闪红色光报警, 解除报警时报警图形变红色不闪光。用鼠标点击某参数时, 图 19 所示的对应线段显示报警颜色, 参见表 3, 并使相应的复合功角图或其分图对应的图形变红色, 漏磁报警时线段  $T_{22}Z_{22}$  变红色, 标示  $\Phi_{D0}$  变红色。

表 3 隐极同步电机复合功角图报警表

报警量	复合功角图	复合功角图分图 I	复合功角图分图 II	复合功角图分图 III	复合功角图分图 IV
同步电机机端电压 $U_{ab} U_{bc} U_{ca}$	$D_{10}C_{10}$	$D_{11}C_{11}$			$D_{15}A_{15}$
同步电机定子合成磁通量	$D_{10}C_{10}$		$C_{12}C_{13}$	$D_{14}C_{14}$	$D_{15}A_{15}$
同步电机励磁电压及电流 $u_f, i_f$	$D_{10}A_{10}$	$D_{11}A_{11}$			$D_{15}A_{15}$
同步电机转子磁通量	$D_{10}A_{10}$		$A_{12}A_{13}$	$D_{14}A_{14}$	$D_{15}A_{15}$
系统电压 $U_{xab} U_{xbc} U_{xca}$					$D_{15}C_{15}$
同步电机定子电流 $I_a I_b I_c$	$C_{10}A_{10}$				
同步电机有功 P	$A_{10}G_{10}$				
同步电机无功 Q	$C_{10}G_{10}$				

s) 数字标识显示画面: 做如图 11 所示的电机一次图形, 并标识所示字母, 在字母后显示相应的数字量, 且可以进行实际值和标么值切换, 报警时标识及数字变红色闪光, 微机喇叭响, 解除报警后变红色不闪光。标识和数字显示的条件:

(a) 当同步电机并网后, 即电机出口断路器 DL 合闸时, 此时电机出口断路器 DL 的状态信号  $U_{DL}$  高电位, 电机出口断路器 DL 变蓝色, 数字显示画面不显示系统侧的电压 ( $U_{xab} U_{xbc} U_{xca}$ ) 及频率 ( $f_x$ ) 的字母标识和数字, 显示其它标识和数字。

(b) 当同步电机解列或并网期间, 即电机出口断路器 DL 分闸时, 此时电机出口断路器 DL 的状态信号  $U_{DL}$  低电位, 电机出口断路器 DL 标识白色, 显示所有标识和数字。

(c) 同步电机工励或备励开关接通时, 其状态信号  $U_{zg}$  或  $U_{zb}$  高电位, 相应开关变蓝色; 励磁开关断开时其状态信号  $U_{zg}$  或  $U_{zb}$  低电位, 相应开关标识白色。

(e) 同步电机出口断路器 DL 分闸时, 令同步电机转子磁通量  $\Sigma\Phi_0$  的数字显示值与定子总磁通量  $\Sigma\Sigma\Phi$  的值相等。同步电机出口断路器 DL 合闸时, 按计算值显示电机转子磁通量  $\Sigma\Phi_0$  的数值。

按上述显像要求, 经程序处理可得到图 14、图 15、图 16、图 17、图 18、图 22 所示的六种图形, 这六种图形之间可以根据使用方要求组合, 组合图形任一画面可以和数字显示画面图 11 组合。可以小范围调整给定的图 14、图 16、图 17、图 18 中的同步电机定子、转子半径, 定子、转子轴心半径, 杠杆粗细, 弹簧连接点半径的大小; 可以将图 14、图 16、图 17、图 18 所示的模型制作成各种三维立体机械模型; 可以根据用户要求调整模型颜色。

## 2) 计算程序要点

### (1) 确定参数

给定参数: 电机定子漏抗  $X_\sigma$ , 同步电机电压、电流、频率折算系数  $K_U$ 、 $K_I$ 、 $K_\omega$ , 系统电压、频率折算系数  $K_{XU}$ 、 $K_{X\omega}$ , 有功、无功功率折算系数  $K_P$ 、 $K_Q$ 、 $K_m$ , 励磁电压及工、备励电压折算系数  $K_L$   $K_{GL}$   $K_{BL}$ , 同步电机励磁电流及工、备励电流折算系数  $K_f$ 、 $K_{Gf}$ 、 $K_{Bf}$ , 同步电机计算系数  $m$ , 负序电压折算系数  $K_F$ , 同步电机机端电压同期折算系数  $K_T$ 、 $K_N$ , 系统电压同期折算系数  $K_{AT}$ 、 $K_{XN}$ , 励磁调节信号电压折算系数  $K_{TV}$ , 漏磁通系数  $K_1$ ,  $K_2$ 。主要参数允许范围: 主要参数包括电机机端电压、定子电流、励磁电压、励磁电流、有功功率、无功功率、定子磁通量、转子磁通量、功角、系统电压。电机额定参数, 主要包括: 电机机端电压、定子电流、励磁电压、励磁电流、有功功率、无功功率、定子磁通量、转子磁通量、系统电压。

### (2) 参数计算:

a	$P_j = K_P P$	$\Sigma P = K_m P_j$	
b	$Q_j = K_Q Q$	$\Sigma Q = K_m Q_j$	
c	$I_{aj} = K_I I_a$	$I_{bj} = K_I I_b$	$I_{cj} = K_I I_c$
d	$U_{abj} = K_U U_{ab}$	$U_{bcj} = K_U U_{bc}$	$U_{caj} = K_U U_{ca}$
e	$I_f = K_f i_L$	$I_{Gf} = K_{Gf} i_G$	$I_{Bf} = K_{Bf} i_{BY}$
f	$F = K_\omega f$	$F_X = K_{X\omega} f_X$	
g	$U_{Fj} = K_F U_F$		

$$\begin{aligned} \text{h} \quad U_{xahj} &= K_{xU} U_{xah} & U_{xbcj} &= K_{xU} U_{xbc} & U_{xcaj} &= K_{xU} U_{xca} \\ \text{i} \quad u_{Lj} &= K_L u_L & u_{Gj} &= K_{GL} u_G & u_{Bj} &= K_{BL} u_B \end{aligned}$$

### (3) 隐极同步电机直轴同步电抗 $X_d$ 值

确定隐极同步电机直轴同步电抗  $X_d$  值有两种方法:

a 根据同步电机通常工作时气隙电势  $E_s$  的值直接给定直轴同步电抗  $X_d$  值,  $X_d$  值不变。

b 根据同步电机气隙电势  $E_s$  和直轴同步电抗  $X_d$  的函数关系确定  $X_d$  值

a) 录制图 12 所示的发电机空载 ( $I_a = 0$ ) 和零功率因数 ( $I_a = I_N$ ) 曲线, 即  $U = f_0(I_f)$  和  $U = f_N(I_f)$  曲线。

b) 确定同步电机气隙电势  $E_s$  与直轴同步电抗  $X_d$  的函数关系

根据  $U = f_0(I_f)$  和  $U = f_N(I_f)$  曲线图, 取  $I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{fn}$   $n$  个励磁电流值, 由零功率因数曲线确定

$U = f_N(I_f)$  曲线上的与  $I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{fn}$  对应的点  $B_1, B_2, \dots, B_n$ , 过点  $B_1, B_2, \dots, B_n$  分别作  $n$  个全等特性三角形 (其中  $CD$  垂直于横坐标,  $CD = I_N * X_\sigma$ ), 分别交空载特性曲线  $U = f_0(I_f)$  于点  $C, C_1, C_2, \dots, C_n$ , 连接点  $O$  和点  $C_1$ , 并延长  $OC_1$  交过点  $B_1$  平行于纵坐标轴的直线于点  $A_1$ , 同理连接点  $O$  和点  $C_2, \dots$  连接点  $O$  和点  $C_n$ , 并延长  $OC_2, \dots$  延长  $OC_n$ , 与平行于纵坐标轴的分别过点  $B_2, \dots, B_n$  的直线交于点  $A_2, \dots, A_n$ 。

则  $E_{s1}, E_{s2}, \dots, E_{sn}$  所对应的同步饱和电抗分别为:  $X_{d1} = \frac{A_1 B_1}{I_N}$ ,  $X_{d2} = \frac{A_2 B_2}{I_N}, \dots, X_{dn} = \frac{A_n B_n}{I_N}$ , 根据  $E_{s1}, E_{s2}, \dots, E_{sn}$  一一对应的同步饱和电抗  $X_{d1}, X_{d2}, \dots, X_{dn}$  的关系绘制气隙电势与饱和电抗的关系图, 如图 13 所示, 由此曲线确定  $X_d = f(E_s)$  函数。

c) 计算

$$\text{令 } \dot{W} = P_j + jQ_j = W \angle \varphi; \quad \dot{U}_a = \frac{U_{aj}}{\sqrt{3}} = e;$$

$$\text{则 } \dot{I}_{aj} = I_{aj} \angle (-\varphi),$$

$$\dot{E}_s = e + j \dot{I}_{aj} * X_\sigma; \quad E_s = |\dot{E}_s|$$

d) 将  $E_s$  值代入  $X_d = f(E_s)$  函数, 得  $X_d$  值

### (4) 计算

$$\text{a} \quad a = e + \frac{Q_L}{m_e} X_d$$

$$\text{b} \quad b = \frac{P_L}{m_e} X_d$$

c 励磁分量计算

两种计算方法:

(a) 突变量算法

设从某一时刻到现在的时间  $\Delta T$  内同步电机平均励磁电势为  $\Sigma E_0$ , 现在励磁电势为  $E_0$ , 设

$\Delta E_0 = E_0 - \Sigma E_0$ ,  $\Delta T$  值和采集励磁电势的次数可以设定。

(b) 调节量算法

设综合放大器自动励磁调节总量为  $\Sigma U$ , 各分量分别为:  $\Delta U = K_{TJ} U_1$   $U' = K_{TJ} U_2$   
 $\Delta f = K_{TJ} U_3$   $\dots X = K_{TJ} U_n$ ;  $\Sigma U = K_{TJ} (U_1 + U_2 + \dots + U_n)$ ,  $f_1 = \frac{K_{TJ} U_1}{\Sigma U}$   $f_2 = \frac{K_{TJ} U_2}{\Sigma U}$   $\dots f_n = \frac{K_{TJ} U_n}{\Sigma U}$

计算  $E_{01} = f_1 \sqrt{a^2 + b^2}$   $E_{02} = f_2 \sqrt{a^2 + b^2}$   $\dots E_{0n} = f_n \sqrt{a^2 + b^2}$

d 磁通量标么值计算: 设同步电动机某磁通量在频率为额定值时, 磁通量标么值与相应电压标么值相同, 根据频率、电压、磁通量的关系, 确定电机励磁磁通、定子总磁通的标么值, 将计算值于给定值比较, 当大于规定值时报警。

e 将各种电气量于给定值比较, 当大于规定值时报警。

f 漏磁通量坐标计算

$$X_1 = K_1 a; Y_1 = K_1 b; X_2 = K_2 (e - a); Y_2 = -K_2 b; X_3 = X_1 + X_2; Y_3 = Y_1 + Y_2$$

(5) 当同期并网或解列时, 既  $I_a = I_b = I_c = 0$  时, 将同步电机电压与系统电压信号输入微机进行下列计算

$$a \quad \dot{U} = K_T (u_{AB} + u_{BC} \angle 120^\circ + u_{CA} \angle 240^\circ) = U \angle \alpha$$

$$b \quad \dot{U}_v = K_{NT} (u_{vAB} + u_{vBC} \angle 120^\circ + u_{vCA} \angle 240^\circ) = U_v \angle \varepsilon$$

$$d \quad \frac{\dot{U}}{U_v} = \frac{U}{U_v} \angle \delta_x$$

e  $\bar{\delta}_x = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{n}$  (其中  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  为一定时间内测得的第一、第二...第  $n$  个  $\delta_x$  的值, 且下一个测量值进入时, 舍去第一个  $\delta_1$  值, 再下一个测量值进入时, 舍去第二个  $\delta_2$  值, 以此类推进行新旧更换, 时间长短及  $n$  值可以设定)

$$f \quad h = K_N U_{abj} * \cos \bar{\delta}_x$$

$$g \quad i = K_N U_{abj} * \sin \bar{\delta}_x$$

$$h \quad j = K_{NV} U_{xahj}$$

(6) 将各种电气量于给定值比较, 当大于规定范围时报警。

利用本发明复合功角仪测量同步电机运行状态绘制的电气、机械模型图、机端合成漏磁图与利用传统的功角仪测量电机运行状态绘制的单一的电气功角矢量图相比较, 具有以下优点:

按凸极同步电机和隐极同步电机分别比较如下。

(一) 凸极同步电机复合功角仪与传统的功角仪比较

1、凸极同步电机复合功角仪可显示六种图形, 它不但显示了凸极同步电机复合功角, 还显示了复合功角分图, 参见图 5—图 9, 能实现图象和声响报警。复合功角图 5 的 PQ 曲线规定了励磁杠杆顶点  $E_0$  的轨迹范围, 图 20 的合成漏磁图规定了同步电机端部发热所允许的定

子、转子合成漏磁的范围，为运行人员提供了直观的电机参数界限图，而传统的功角仪只显示电气矢量图，参见图 6。

2、凸极同步电机复合功角仪显示的复合功角图（图 5）具有双重含义：一方面表示凸极同步电机电气功角矢量图，另一方面表示利用磁通量显示的机械功角图。凸极电机复合功角图表示功角具有电气和机械双重特性。而，原功角图只显示电气矢量，只反应功角的电气特性。

3、复合功角仪显示的图形较电气矢量图增加了同步电机的机械模型，图 7 所示机械模型定子、转子杠杆分别为电机定子内总合成磁通  $\Sigma\Sigma\Phi$ 、励磁合成磁通  $\Sigma\Phi_0$ ，交轴和直轴弹簧的弹性系数分别为  $\frac{4mk^2w^2}{9l_q}$  和  $\frac{4mk^2w^2}{9l_d}$ （其中  $m$  为电机定子相数， $kw$  表示定子线圈有效匝数， $l_q$ 、 $l_d$  分别为电机交轴和直轴同步电感系数），且该图形模拟电机定子和转子逆时针旋转。图 5、图 8 所示机械模型以定子为参照物，定子、转子杠杆分别为  $\Sigma\Sigma\Phi$ 、 $\Sigma\Phi_0$ ，交轴和直轴弹簧的弹性系数分别为  $\frac{2mk^2w^2}{9l_q}$  和  $\frac{2mk^2w^2}{9l_d}$ 。

机械功角图从机械方面直观显示了电机定子和转子相互作用的关系，工作人员可以参照机械模型理解电机做功的原理，准确调节电机参数。

4、复合功角图较电气矢量图增加了辅助线，如图 5 所示

1) 如用  $OE_0$ 、 $OU$  长度分别表示发电机励磁电势和机端电压， $UE_q$ 、 $UE_d$  分别表示同步电机定子电势的交轴分量和直轴分量， $E_qM$ 、 $MU$  分别表示同步电机定子交轴电势的有功和无功分量，点  $M$  在  $OU$  线段上或与点  $U$  重合分别表示交轴电势所做的感性无功为负值或零，点  $E_q$  在  $OU$  直线的上方、下方或与直线重合，分别表示交轴电势所做的有功为正值、负值或为零， $E_dN$ 、 $NU$  分别表示同步电机定子直轴电势的有功和无功分量，点  $N$  在  $OU$  线段上、 $OU$  线段延长线上或与点  $U$  重合分别表示直轴电势所做的感性无功为负值、正值或为零，点  $E_d$  在  $OU$  直线的上方、下方或与直线重合，分别表示直轴电势所做的有功为正值、负值或为零。

2) 如果用  $OE_0$ 、 $OU$  长度分别表示发电机励磁磁通量和定子线圈内合成总磁通量， $UE_q$ 、 $UE_d$  分别表示同步电机定子电枢反应合成磁通量的交轴分量和直轴分量。

3) 如果用  $OE_0$ 、 $OU$  长度分别表示同步电机转子杠杆和定子杠杆， $UE_q$ 、 $UE_d$  分别表示同步电机转子杠杆对定子杠杆交轴和直轴方向产生拉力的弹簧被拉伸的长度，线段  $E_qM$ 、 $E_dN$  分别表示交轴和直轴弹簧被拉伸而产生有功的长度分量，逆时针或顺时针方向的拉力分别产生正有功或负有功，线段  $MU$ 、 $UN$  分别表示交轴和直轴弹簧被拉伸而产生无功的分量，延点  $O$  至点  $U$  方向拉力产生正感性无功，反之产生负感性无功。粗略地看，可以把  $E_qM \pm E_dN$  的和看成有功功率，把  $MU \pm UN$  的和看成无功功率，弹簧产生的力一致时相加，反之相减。

5、凸极同步电机复合功角图（图 5）较电气矢量图（图 6）增加了显示励磁调节信号的图形。

增加励磁调节显示,可以帮助运行人员直观检查自动励磁调节器的工作状态,直观判断调节信号对电力系统稳定运行的影响,事故情况下及时正确地调整励磁。

6、新增加的同期图像（图 9）直观显示了同步电机转子刚体磁杠杆和电力系统磁杠杆的相对位置,可以帮主运行人员正确调整电机转速和机端电压。

## （二）隐极同步电机功角仪与现有的功角仪比较

1、隐极同步电机复合功角仪显示五种图形,它不但显示了隐极同步电机复合功角,还显示了复合功角分图,参见图 14—图 18,能实现图象和声响报警,复合功角图 14 的 PQ 曲线规定了励磁杠杆顶点  $E_0$  的轨迹范围,而图 22 的漏磁合成图也规定了同步电机端部发热所允许的定子、转子合成漏磁的范围,为运行人员提供了直观的电机参数界限图,现有的功角仪只显示电气矢量图,参见图 15。

2、隐极同步电机复合功角仪显示的复合功角图（图 14）具有双重含义：一方面表示隐极同步电机电气功角矢量图,另一方面表示利用磁通量显示的机械功角图。隐极电机复合功角图显示同步电机功角具有电气和机械双重特性。而原功角图（图 15）只显示电气矢量,只反应功角的电气特性。

3、复合功角仪显示的图形,较现在的功角仪显示的电气矢量图增加了同步电机的机械模型,从机械方面直观显示了电机定子和转子相互作用的关系,图 16 所示机械模型定子、转子杠杆分别为电机定子内总合成磁通  $\Sigma\Sigma\Phi$ 、励磁合成磁通  $\Sigma\Phi_0$ , 弹簧的弹性系数为  $\frac{4mk^2w^2}{9l}$  (其中  $m$  为电机定子相数,  $kw$  表示定子线圈有效匝数,  $l$  分别为电机同步电感系数), 且该图形模拟电机定子和转子逆时针旋转。图 14、图 17 所示机械模型以定子为参照物, 定子、转子杠杆分别为  $\Sigma\Sigma\Phi$ 、 $\Sigma\Phi_0$ , 弹簧的弹性系数分别为  $\frac{2mk^2w^2}{9l}$ 。

机械功角图从机械方面直观显示了电机定子和转子相互作用的关系, 工作人员可以参照机械模型理解电机做功的原理, 准确调节电机参数。

4、复合功角图较电气矢量图增加了辅助线, 如图 14 所示。

1) 用  $OE_0$ 、 $OU$  长度分别表示电机励磁电势和机端电压,  $E_0U$ 、 $E_0M$ 、 $UM$  分别表示电机定子电势、定子电势的有功分量和无功分量; 点  $M$  在  $OU$  线段上、在  $OU$  线段的延长线上及与点  $U$  重合分别表示电机发容性无功、感性无功及无功为零。点  $E_0$  在  $OU$  直线的上、下方或与  $OU$  重合分别说明电机为发电机、电动机或有功为零。

2) 用  $OE_0$ 、 $OU$  长度分别表示电机励磁磁通量杠杆和定子线圈内总磁通量杠杆,  $E_0U$ 、 $E_0M$ 、



UM 分别表示发电机机械杠杆弹簧被拉伸的长度、弹簧被拉伸长度的有功分量和无功分量；点 M 在 OU 线段上、在 OU 线段的延长线上及与点 U 重合分别表示电机发容性无功、感性无功及无功为零。点  $E_0$  在 OU 杠杆的上、下方或与 OU 直线重合分别说明弹簧对定子逆时针、顺时针产生转矩或不产生转矩，电机则以发电机、电动机或有功为零的方式运行。

3) 如果用  $UE_0$  的长度表示电机视在功率 W 的大小，则  $E_0M$ 、UM 的长度分别表示发电机的有功功率和无功功率的大小。

4) 如果用  $UE_0$  的长度表示电机定子电流 I 大小，则  $E_0M$ 、UM 的长度分别表示电机定子电流的有功和无功分量  $I_p$  和  $I_q$  的大小。

5) 隐极同步电机复合功角图（图 14）较电气矢量图（图 15）增加了显示励磁调节信号的图形。

增加励磁调节显示, 可以帮助运行人员直观检查自动励磁调节器的工作状态, 直观判断调节信号对电力系统稳定运行的影响, 事故情况下及时正确地调整励磁。

6) 新增加的同期图像（图 18）直观显示了同步电机转子刚体磁杠杆和电力系统磁杠杆的相对位置, 可以帮助运行人员正确调整电机转速和机端电压。

### 工业实用性

本发明可从电气和机械两方面直观反映同步电机的运行状态、可以显示同步电机端部合成漏磁情况。绘制的电机复合功角图较电气矢量图增加了同步电机的机械模型图, 有利于各种专业运行人员从电气、机械两方面辩证分析同步电机运行状态; 绘制的同步电机端部合成漏磁图, 有利于运行人员分析和监视同步电机端部发热状况。本发明方法可成为电力系统生产中人们用以同步电机励磁特性分析、励磁调试、同期并网、运行监视和控制等工作的有效工具, 以使同步电机工作在最佳状态。

## 权 利 要 求

1、一种利用复合功角仪测量同步电机运行状态的方法，它包括以下步骤：

- a、获取同步电机及系统的各种电信号和数字信号；
- b、通过复合功角仪内部的数据采集部分将上述电信号转换成数字信号，并将所获得的全部数字信号输入计算机主机；
- c、利用键盘和鼠标向计算机主机输入相关参数或命令；
- d、由计算机对相关数据进行程序处理，按计算程序演算，得到有关点的坐标及相关数据并将结果输入显像程序；
- e、计算机利用主要点的坐标及运算结果，通过显像程序处理，绘制同步电机的各种电气及机械模型图、电机端部合成漏磁图，由显示器显示随电机参数变化而变化的动态复合功角图、电机端部合成漏磁图，并实现报警等功能。

2、根据权利要求1所述的利用复合功角仪测量同步电机运行状态的方法，其特征在于：所述显像程序处理包括：建立图像坐标、成像；所述计算程序处理包括：确定参数、参数计算、确定同步电机直轴同步电抗值、报警。

3、根据权利要求2所述的利用复合功角仪测量同步电机运行状态的方法，其特征在于：所述显像程序处理和计算程序处理，对于隐极同步电机，包括以下步骤：

所述显像程序处理：

① 建立隐极同步电机复合功角图、电气功角矢量图、电机机械模型、电机机械模型简图、同期复合功角图、电机端部合成漏磁图的图像坐标：

复合功角图：  $A_{10}(a, b)$        $C_{10}(e, 0)$        $D_{10}(0, 0)$        $G_{10}(a, 0)$

电气功角矢量图  $A_{11}(a, b)$        $C_{11}(e, 0)$        $D_{11}(0, 0)$

电机机械模型  $A_{12}(\frac{a}{2}, \frac{b}{2})$        $C_{12}(\frac{e}{2}, 0)$        $D_{12}(0, 0)$

$A_{13}(-\frac{a}{2}, -\frac{b}{2})$        $C_{13}(-\frac{e}{2}, 0)$

电机机械模型简图  $A_{14}(a, b)$        $C_{14}(e, 0)$        $D_{14}(0, 0)$

同期复合功角图  $A_{15}(h, i)$        $C_{15}(j, 0)$        $D_{15}(0, 0)$

电机端部合成漏磁图  $T_{22}(0, 0)$        $X_{22}(X_1, Y_1)$        $Y_{22}(X_2, Y_2)$        $Z_{22}(X_3, Y_3)$

其中，点  $A_{10}$ 、 $A_{11}$ 、 $A_{14}$  是同步电机励磁电势矢量顶点的平面坐标；

点  $C_{10}$ 、 $C_{11}$ 、 $C_{14}$  是同步电机机端电压矢量顶点的平面坐标；

点  $D_{10}$ 、 $D_{11}$ 、 $D_{12}$ 、 $D_{14}$  是同步电机功角矢量顶点的平面坐标；

点  $A_{12}$  是同步电机励磁电势矢量中点的平面坐标；

点  $C_{12}$  坐标值是同步电机机端电压矢量中点的平面坐标;

点  $A_{15}$  距点  $D_{15}$  的距离为同期时同步电机的机端电压, 点  $C_{15}$  距点  $D_{15}$  的距离为同期时系统电压;

$T_{22}$ 、 $X_{22}$ 、 $Y_{22}$ 、 $Z_{22}$  为电机端部合成漏磁图图像坐标;

## ② 成像要点

a) 各图的坐标点只和本图组合, 只在本图成像, 图像平滑移动;

b) 同步电机转子刚体轴心: 分别以点  $D_{10}$   $D_{12}$   $D_{14}$   $D_{15}$  为圆心, 以同步电机额定工作时  $C_{10}D_{10}$  线段的  $\frac{1}{20}$  长度为半径画圆, 圆为白色;

c) 同步电机转子刚体: 分别以点  $D_{10}$   $D_{12}$   $D_{14}$   $D_{15}$  为圆心, 以同步电机额定工作时  $C_{10}D_{10}$  线段的  $\frac{1}{5}$  长度为半径画圆, 转子刚体圆与转子刚体轴心圆相交部分仍为白色, 其余用深蓝色表示;

d) 同步电机转子杠杆: 杠杆为蓝色 (与转子刚体同色), 线粗与轴心圆的直径相同, 杠杆与转子轴心相交部分仍为白色;

点  $D_{10}$  与点  $A_{10}$  之间, 点  $A_{12}$  与点  $A_{13}$  之间, 点  $A_{14}$  与点  $D_{14}$  之间, 点  $A_{15}$  与点  $D_{15}$  之间用杠杆连接;

e) 定子刚体: 以点  $D_{12}$  为圆心, 以同步电机额定工作时  $C_{10}D_{10}$  线段的  $\frac{1}{5}$  长度为半径画圆, 此圆和转子刚体圆, 转子轴心圆及转子杠杆重合之外的部分, 用浅灰色表示;

在点  $C_{10}$  与点  $D_{10}$ , 点  $C_{14}$  与点  $D_{14}$ , 点  $C_{15}$  与点  $D_{15}$  之间分别用细实线连接, 两侧各延长同步电机额定工作时  $C_{10}D_{10}$  线段的  $\frac{1}{2}$  长度, 与转子刚体圆、转子轴心圆相交部分用虚线表示, 线下方用平行的细短斜线作阴影标记, 转子刚体圆、转子轴心圆部分不作阴影标记;

f) 定子杠杆: 点  $C_{12}$  点  $C_{13}$  之间用定子杠杆表示, 定子杠杆粗与转子杠杆同, 颜色与定子刚体同, 与转子刚体圆, 轴心圆相交部分仍显示转子刚体圆及轴心圆的颜色;

点  $C_{10}$  与点  $D_{10}$ , 点  $C_{14}$  与点  $D_{14}$ , 点  $C_{15}$  与点  $D_{15}$  之间用黑粗细线连接表示杠杆, 线粗为轴心圆半径, 与转子刚体圆、转子轴心圆相交部分用细虚线表示;

g) 弹簧: 黑色, 形象逼真, 随着弹簧的伸长和缩短, 有拉伸和收缩的视觉, 弹簧与杠杆之间应有明显的连接点;

点  $A_{10}$  与  $C_{10}$  点之间, 点  $A_{12}$  与点  $C_{12}$  之间, 点  $A_{13}$  与点  $C_{13}$  之间, 点  $A_{14}$  与点  $C_{14}$  之间弹簧连接;

h) 弹簧与杠杆之间的连接点: 用白色圆表示, 圆直径略小于杠杆直径, 居杠杆和弹簧轴心, 和弹簧之间有明显的连接视觉; 杠杆顶端表示连接点的圆的圆心距杠杆两边的距离等于距杠杆端部的距离;

i) 线段: 点  $A_{10}$  点  $G_{10}$  点, 点  $C_{10}$  点  $G_{10}$ , 用细黑线连接;

j) 矢量: 点  $D_{11}$  和点  $A_{11}$  之间, 用带一个箭头的线段表示, 箭头指向点  $A_{11}$ ; 点  $D_{11}$  和点  $C_{11}$

之间,用带一个箭头的线段表示,箭头指向点  $C_{11}$ ; 点  $C_{11}$  和点  $A_{11}$  之间,用带一个箭头的线段表示,箭头指向点  $C_{11}$ 。点  $T_{22}$  与点  $X_{22}$  之间用黑色带箭头的粗线段表示,箭头指向点  $X_{22}$ ; 点  $T_{22}$  与点  $Y_{22}$  之间用黑色带箭头的粗线段表示,箭头指向点  $Y_{22}$ ; 点  $T_{22}$  与点  $Z_{22}$  之间用彩色带箭头的粗线段表示,箭头指向点  $Z_{22}$ ; 点  $X_{22}$  与点  $Z_{22}$ 、 $Y_{22}$  与点  $Z_{22}$  之间用黑色细虚线段表示;

k) 坐标点的标识:

点  $A_{10}$  标 “ $E_0$ ”, 点  $C_{10}$  标 “U”, 点  $D_{10}$  标 “O”, 点  $G_{10}$  标 “M”;

点  $A_{11}$  标 “ $\dot{E}_0$ ”, 点  $C_{11}$  标 “ $\dot{U}$ ”, 点  $D_{11}$  标 “O”, 线段  $A_{11}C_{11}$  标 “ $\dot{E}_a$ ”;

点  $A_{12}$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}$ ”, 点  $C_{12}$  标 “ $\Sigma\Sigma\dot{\Phi}$ ”, 点  $D_{12}$  标 “O”;

点  $A_{14}$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}$ ”, 点  $C_{14}$  标 “ $\Sigma\Sigma\dot{\Phi}$ ”, 点  $D_{14}$  标 “O”;

点  $A_{15}$  标 “ $E_0$ ”, 点  $C_{15}$  标 “U”, 点  $D_{15}$  标 “O”;

漏磁合成图标识: 点  $X_{22}$ 、 $Y_{22}$ 、 $Z_{22}$  分别标为  $\Sigma\dot{\Phi}_{\theta_0}$ 、 $\Sigma\dot{\Phi}_{\theta_0}$ 、 $\Sigma\dot{\Phi}_{D_0}$

标识随着坐标点的位置的移动而移动, 各标识与对应的作标点的相对位置保持不变;

l) 功角标识: 表示功角的虚线通转子中心, 与杠杆轴心重合, 长不大于同步电机额定工作时  $C_{10}D_{10}$  线段长度的三分之一. 在功角范围内标 “ $\delta$ ”, 功角两侧杠杆之间用圆弧连接, 且圆弧顶点随杠杆的位置变化而变化, 圆弧半径大于转子刚体圆的半径, 圆弧圆心与定子轴心重合;

m) 励磁调节信号标识:

两种方法:

(a) 根据突变量算法, 按  $\Delta E_0$  所占现在励磁电势百分长度, 当  $\Delta E_0$  大于某一给定值时显示励磁电势突变量, 当  $\Delta E_0$  为正值时, 由励磁杠杆顶部向转子轴心排列,  $\Delta E_0$  为负值时由转子轴心延励磁电势反方向排列;

(b) 根据调节量算法计算的结果, 按  $E_{01}$ 、 $E_{02}$ 、…… $E_{0n}$  值, 将各调节量以不同的颜色, 按所占百分长度, 调增信号依次由励磁杠杆顶部向转子轴心紧密排列, 调减信号则由转子轴心顺次延励磁电势反方直线紧密排列;

屏幕上标识各调节信号的颜色。

n) 标识 PQ 曲线: 根据同步电机端部发热极限、系统允许同步电机最大运行功角确定点  $M_{10}$  至点  $N_{10}$  的曲线; 根据同步电机允许最大有功功率确定  $N_{10}O_{10}$  曲线, 根据同步电机允许的最大定子磁通量、最大定子电流、最大定子电势确定  $O_{10}P_{10}$  曲线, 根据同步电机允许的最大转子磁通量、最大转子电流、最大转子电压确定  $P_{10}Q_{10}$  曲线; 点  $M_{10}$ 、点  $Q_{10}$  均在  $D_{10}G_{10}$  直线上, 点  $G_{10}$ 、点  $Q_{10}$  之间用细直线连接; 曲线  $M_{10}N_{10}O_{10}P_{10}Q_{10}$  (不含直线段  $M_{10}Q_{10}$ ) 用粗实线连接, 颜色根据用户要求定;

o) 合成漏磁图报警圆: 以点  $T_{22}$  为原点、以同步电机最大允许漏磁通量为半径画圆, 此

圆为报警圆，用粗彩线表示；

p) 同期图象要求：以点  $D_{15}$  为圆心，分别以线段  $D_{15}A_{15}$ 、 $D_{15}C_{15}$  为半径画虚线圆；

q) 机械模型可以动态逆时针旋转，屏面标识模型转速与实物转速的比值，转速比可以选择；

r) 图形报警显示：各电气量或磁通量报警时，标识变红色闪光，微机喇叭响，复合功角图及其分图、漏磁图画面对应线段变红色闪光，解除报警时报警标识及线段变红色不闪光；

s) 按上述显像要求，经程序处理得到的六种图形可以根据使用方要求组合，任一组合画面可以和数字显示画面图 11 组合；可以小范围调整给定的复合功角图及其分图中的同步电机定子、转子半径，定子、转子轴心半径，杠杆粗细，弹簧连接点半径的大小；可以将机械模型图制作成各种三维立体机械模型图；可以根据用户要求调整模型颜色；

所述计算程序处理：

#### (1) 确定参数

给定参数：电机定子漏抗  $X_\sigma$ ，同步电机电压、电流、频率折算系数  $K_U$ 、 $K_I$ 、 $K_\omega$ ，系统电压、频率折算系数  $K_{XU}$ 、 $K_{X\omega}$ ，有功、无功功率折算系数  $K_P$ 、 $K_Q$ 、 $K_m$ ，励磁电压及工、备励电压折算系数  $K_L$ 、 $K_{GL}$ 、 $K_{BL}$ ，同步电机励磁电流及工、备励电流折算系数  $K_f$ 、 $K_{Gf}$ 、 $K_{Bf}$ ，同步电机计算系数  $m$ ，负序电压折算系数  $K_F$ ，同步电机机端电压同期折算系数  $K_T$ 、 $K_N$ ，系统电压同期折算系数  $K_{XT}$ 、 $K_{XN}$ ，励磁调节信号电压折算系数  $K_{TJ}$ ，漏磁通系数  $K_1$ ， $K_2$ ；主要参数允许范围：主要参数包括电机机端电压、定子电流、励磁电压、励磁电流、有功功率、无功功率、定子磁通量、转子磁通量、功角、系统电压；电机额定参数，主要包括：电机机端电压、定子电流、励磁电压、励磁电流、有功功率、无功功率、定子磁通量、转子磁通量、系统电压；

#### (2) 参数计算

$$\begin{array}{lll}
 \text{a} & P_j = K_P P & \Sigma P = K_m P_j \\
 \text{b} & Q_j = K_Q Q & \Sigma Q = K_m Q_j \\
 \text{c} & I_{aj} = K_I I_a & I_{bj} = K_I I_b & I_{cj} = K_I I_c \\
 \text{d} & U_{abj} = K_U U_{ab} & U_{bcj} = K_U U_{bc} & U_{caj} = K_U U_{ca} \\
 \text{e} & I_f = K_f i_L & I_{Gf} = K_{Gf} i_G & I_{Bf} = K_{Bf} i_{BY} \\
 \text{f} & F = K_\omega f & F_X = K_{X\omega} f_X \\
 \text{g} & U_{Fj} = K_F U_F \\
 \text{h} & U_{xabj} = K_{XU} U_{xab} & U_{xbcj} = K_{XU} U_{xbc} & U_{xcaj} = K_{XU} U_{xca} \\
 \text{i} & u_{Lj} = K_L u_L & u_{Gj} = K_{GL} u_G & u_{Bj} = K_{BL} u_B
 \end{array}$$

#### (3) 隐极同步电机直轴同步电抗 $X_d$ 值

确定隐极同步电机直轴同步电抗  $X_d$  值有两种方法:

a 根据同步电机通常工作时气隙电势  $E_s$  的值直接给定直轴同步电抗  $X_d$  值,  $X_d$  值不变;

b 根据同步电机气隙电势  $E_s$  和直轴同步电抗  $X_d$  的函数关系确定  $X_d$  值;

a) 绘制发电机空载 ( $I_a = 0$ ) 和零功率因数 ( $I_a = I_N$ ) 曲线, 即  $U = f_0(I_f)$  和  $U = f_N(I_f)$

曲线,

b) 确定同步电机气隙电势  $E_s$  与直轴同步电抗  $X_d$  的函数关系,

根据  $U = f_0(I_f)$  和  $U = f_N(I_f)$  曲线图, 取  $I_{f1}$   $I_{f2}$   $\cdots$   $I_{fn}$   $n$  个励磁电流值, 由零功率因数曲线确定  $U = f_N(I_f)$  曲线上的与  $I_{f1}$   $I_{f2}$   $\cdots$   $I_{fn}$  对应的点  $B_1$   $B_2$   $\cdots$   $B_n$ , 过点  $B_1$   $B_2$   $\cdots$   $B_n$  分别作  $n$  个全等特性三角形 (其中  $CD$  垂直于横坐标,  $CD = I_N * X_\sigma$ ), 分别交空载特性曲线  $U = f_0(I_f)$  于点  $C_1$   $C_2$   $\cdots$   $C_n$ , 连接点  $O$  和点  $C_1$ , 并延长  $OC_1$  交过点  $B_1$  平行于纵坐标轴的直线于点  $A_1$ , 同理连接点  $O$  和点  $C_2$ 、 $\cdots$  连接点  $O$  和点  $C_n$ , 并延长  $OC_2$   $\cdots$  延长  $OC_n$ , 与平行于纵坐标轴的分别过点  $B_2$   $\cdots$   $B_n$  的直线交于点  $A_2$   $\cdots$   $A_n$ ;

则  $E_{s1}$   $E_{s2}$   $\cdots$   $E_{sn}$  所对应的同步饱和电抗分别为:  $X_{d1} = \frac{A_1 B_1}{I_N}$ ,  $X_{d2} = \frac{A_2 B_2}{I_N}$   $\cdots$   $X_{dn} = \frac{A_n B_n}{I_N}$ , 根据  $E_{s1}$ ,  $E_{s2}$   $\cdots$   $E_{sn}$  一一对应的同步饱和电抗  $X_{d1}$ ,  $X_{d2}$   $\cdots$   $X_{dn}$  的关系绘制气隙电势与饱和电抗的关系图,

c) 计算

$$\dot{W} = P_j + jQ_j = W \angle \varphi \quad \dot{U}_a = \frac{U_{aj}}{\sqrt{3}} = e$$

$$\text{则 } \dot{I}_{aj} = I_{aj} \angle (-\varphi)$$

$$\dot{E}_s = e + j\dot{I}_{aj} * X_\sigma \quad E_s = |\dot{E}_s|$$

d) 将  $E_s$  值代入  $X_d = f(E_s)$  函数, 得  $X_d$  值;

(4) 计算

$$a \quad a = e + \frac{Q_d}{me} X_d$$

$$b \quad b = \frac{P_d}{me} X_d$$

c 励磁分量计算

两种计算方法:

(a) 突变量算法

设从某一时刻到现在的时间  $\Delta T$  内同步电机平均励磁电势为  $\Sigma E_0$ , 现在励磁电势为  $E_0$ , 设  $\Delta E_0 = E_0 - \Sigma E_0$ ,  $\Delta T$  值和采集励磁电势的次数可以设定;

(b) 调节量算法

设综合放大器自动励磁调节总量为  $\Sigma U$ , 各分量分别为:  $\Delta U = K_{TJ} U_1$   $U' = K_{TJ} U_2$   $\Delta f = K_{TJ} U_3$   $\cdots$   $X = K_{TJ} U_n$ ;  $\Sigma U = K_{TJ} (U_1 + U_2 + \cdots + U_n)$ ,  $f_1 = \frac{K_{TJ} U_1}{\Sigma U}$   $f_2 = \frac{K_{TJ} U_2}{\Sigma U}$   $\cdots$   $f_n = \frac{K_{TJ} U_n}{\Sigma U}$

$$\text{计算 } E_{01} = f_1 \sqrt{a^2 + b^2} \quad E_{02} = f_2 \sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots \quad E_{0n} = f_n \sqrt{a^2 + b^2}$$

d 磁通量标么值计算：设同步电动机某磁通量在频率为额定值时，磁通量标么值与相应电压标么值相同，根据频率、电压、磁通量的关系，确定电机励磁磁通、定子总磁通的标么值，将计算值于给定值比较，当大于规定值时报警；

e 将各种电气量于给定值比较，当大于规定值时报警；

f 漏磁通量坐标计算

$$X_1 = K_1 a; Y_1 = K_1 b; X_2 = K_2 (e - a); Y_2 = -K_2 b; X_3 = X_1 + X_2; Y_3 = Y_1 + Y_2$$

(5) 当同期并网或解列时，既  $I_a = I_b = I_c = 0$  时，将同步电机电压与系统电压信号输入微机进行下列计算：

$$a \quad \dot{U} = K_T (u_{AB} + u_{BC} \angle 120^\circ + u_{CA} \angle 240^\circ) = U \angle \alpha$$

$$b \quad \dot{U}_x = K_{AT} (u_{xAB} + u_{xBC} \angle 120^\circ + u_{xCA} \angle 240^\circ) = U_x \angle \varepsilon$$

$$c \quad \frac{\dot{U}}{U_x} = \frac{U}{U_x} \angle \delta_x$$

d  $\bar{\delta}_x = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{n}$  (其中  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  为一定时间内测得的第一、第二...第  $n$  个  $\delta_x$  的值，且下一个测量值进入时，舍去第一个  $\delta_1$  值，再下一个测量值进入时，舍去第二个  $\delta_2$  值，以此类推进行新旧更换，时间长短及  $n$  值可以设定)

$$e \quad h = K_N U_{abj} * \cos \bar{\delta}_x$$

$$f \quad i = K_N U_{abj} * \sin \bar{\delta}_x$$

$$g \quad j = K_{NN} U_{xabj}$$

(6) 将各种电气量于给定值比较，当大于规定范围时报警。

4、根据权利要求 2 所述的利用复合功角仪测量同步电机运行状态的方法，其特征在于：所述显像程序处理和计算程序处理，对于凸极同步电机，包括以下步骤：

所述显像程序处理：

① 建立凸极同步电机复合功角图、电气功角矢量图、电机机械模型、电机机械模型简图、同期复合功角图、电机机端合成漏磁图的图像坐标：

复合功角图：  $A_0(a, b)$      $B_0(c, d)$      $C_0(e, 0)$      $D_0(0, 0)$      $E_0(f, g)$      $F_0(f, 0)$   
 $G_0(c, 0)$

电气功角矢量图：  $A_1(a, b)$      $C_1(e, 0)$      $D_1(0, 0)$      $E_1(f, g)$

电机机械模型：  $A_2(\frac{a}{2}, \frac{b}{2})$      $B_2(\frac{c}{2}, \frac{d}{2})$      $C_2(\frac{e}{2}, 0)$      $D_2(0, 0)$      $E_2(\frac{f}{2}, \frac{g}{2})$

$A_3(-\frac{a}{2}, -\frac{b}{2})$      $B_3(-\frac{c}{2}, -\frac{d}{2})$      $C_3(-\frac{e}{2}, 0)$      $E_3(-\frac{f}{2}, -\frac{g}{2})$

电机机械模型简图：  $A_4(a, b)$      $B_4(c, d)$      $C_4(e, 0)$      $D_4(0, 0)$      $E_4(f, g)$

同期复合功角图：  $A_5(h, i)$      $C_5(j, 0)$      $D_5(0, 0)$

电机机端合成漏磁图:  $T_{20} (0, 0)$        $X_{20} (X_1, Y_1)$        $Y_{20} (X_2, Y_2)$        $Z_{20} (X_3, Y_3)$

其中, 点  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_4$  是同步电机励磁电势矢量顶点的平面坐标; 点  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_4$  是同步电机机端电压矢量顶点的平面坐标; 点  $D_0$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_4$  是同步电机功角矢量顶点的平面坐标; 点  $A_2$  是同步电机励磁电势矢量中点的平面坐标; 点  $C_2$  是同步电机机端电压矢量中点的平面坐标; 点  $A_5$  距点  $D_5$  的距离为同期时同步电机的机端电压, 点  $C_5$  距点  $D_5$  的距离为同期时系统电压;  $T_{20}$ 、 $X_{20}$ 、 $Y_{20}$ 、 $Z_{20}$  为电机机端合成漏磁图图像坐标;

## ② 成像要点

- a) 各图的坐标点只和本图组合, 只在本图成像, 图像平滑移动;
  - b) 同步电机转子刚体轴心: 分别以点  $D_0$ 、 $D_2$ 、 $D_4$ 、 $D_5$  为圆心, 以同步电机额定工作时  $C_0D_0$  线段的  $\frac{1}{20}$  长度为半径画圆;
  - c) 同步电机转子刚体: 分别以点  $D_0$ 、 $D_2$ 、 $D_4$ 、 $D_5$  为圆心, 以同步电机额定工作时  $C_0D_0$  线段的  $\frac{1}{4}$  长度为半径画圆;
  - d) 同步电机转子杠杆: 杠杆为深蓝色 (与转子刚体同色), 线粗与轴心圆的直径相同, 转子杠杆为 T 形杠杆时, 复合功角图、电机机械模型简图、同期复合功角图的 T 形杠杆的顶部横杆长度是同步电机额定运行时  $D_0C_0$  线段的两倍且居中; 电机机械模型中的 T 形杠杆的顶部横杆长度是同步电机额定运行时  $D_2C_2$  长度的两倍且居中;
- 点  $D_0$  与点  $A_0$  之间, 点  $A_3$  与点  $A_2$  之间, 点  $D_4$  与点  $A_4$  之间, 点  $D_5$  与点  $A_5$  之间用杠杆连接;
- e) 定子刚体: 以点  $D_2$  为圆心, 以同步电机额定工作时  $C_0D_0$  线段的  $\frac{1}{3}$  长度为半径画圆, 此圆和转子刚体圆;

在点  $C_0$  与点  $D_0$ , 点  $C_4$  与点  $D_4$ , 点  $C_5$  与点  $D_5$  之间分别用细实线连接, 两侧各延长同步电机额定工作时  $C_0D_0$  线段的  $\frac{1}{2}$  长度, 与转子刚体圆、转子轴心圆相交部分用虚线表示, 线下方用平行的细短斜线作阴影标记, 转子刚体圆、转子轴心圆部分不作阴影标记;

- f) 定子杠杆: 点  $C_2$  点  $C_3$  之间用定子杠杆表示, 定子杠杆粗细与转子杠杆同; 点  $C_0$  与点  $D_0$ , 点  $C_4$  与点  $D_4$ , 点  $C_5$  与点  $D_5$  之间用黑粗线连接表示杠杆, 线粗为轴心圆半径, 与转子轴心圆、转子刚体圆相交部分用细虚线表示;

- g) 弹簧: 黑色, 形象逼真, 随着弹簧的伸长和缩短, 有拉伸和收缩的视觉, 弹簧与杠杆之间应有明显的连接点;

点  $B_0$  与点  $C_0$  点之间, 点  $E_0$  与点  $C_0$  点之间, 点  $B_2$  与点  $C_2$  之间, 点  $E_2$  与点  $C_2$  之间, 点  $B_3$  与点  $C_3$  之间, 点  $E_3$  与点  $C_3$  之间, 点  $B_4$  与点  $C_4$ , 点  $E_4$  与点  $C_4$  之间之间弹簧连接;

- h) 弹簧与杠杆之间的连接点: 用白色圆表示, 圆的直径略小于杠杆直径, 居杠杆和弹簧轴心, 和弹簧之间有明显的连接视觉; 杠杆顶端表示连接点的圆的圆心距杠杆两边的距离



等于距杠杆端部的距离；

i) 线段：点  $E_0$  与点  $F_0$ ，点  $B_0$  与点  $G_0$ ，点  $C_0$  与点  $G_0$ ，用细黑线连接；

j) 矢量：点  $D_1$  和点  $A_1$  之间，用带一个箭头的线段表示，箭头指向点  $A_1$ ；点  $E_1$  和点  $A_1$  之间，用带一个箭头的线段表示，箭头指向点  $A_1$ ；点  $C_1$  和点  $E_1$  之间，用带一个箭头的线段表示，箭头指向点  $E_1$ ；点  $D_1$  和点  $C_1$  之间，用带一个箭头的线段表示，箭头指向点  $C_1$ 。线段  $E_1A_1$  在线段  $D_1A_1$  的下方；点  $T_{20}$  与点  $X_{20}$  之间用黑色带箭头的粗线段表示，箭头指向点  $X_{20}$ ；点  $T_{20}$  与点  $Y_{20}$  之间用黑色带箭头的粗线段表示，箭头指向点  $Y_{20}$ ；点  $T_{20}$  与点  $Z_{20}$  之间用彩色带箭头的粗线段表示，箭头指向点  $Z_{20}$ ；点  $X_{20}$  与点  $Z_{20}$ 、 $Y_{20}$  与点  $Z_{20}$  之间用黑色细虚线段表示；

k) 坐标点的标识：

点  $A_0$  标 “ $E_0$ ”，点  $B_0$  标 “ $E_d$ ”，点  $C_0$  标 “U”，点  $D_0$  标 “O”，点  $E_0$  标 “ $E_q$ ”，点  $F_0$  标 “M”，点  $G_0$  标 “N”；

点  $A_1$  上部标 “ $\dot{E}_0$ ”，下部标 “ $\dot{E}_d$ ”，点  $C_1$  标 “ $\dot{U}$ ”，点  $D_1$  标 “O”，点  $E_1$  标 “ $\dot{E}_q$ ”；

点  $A_2$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_0$ ”，点  $B_2$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_d$ ”，点  $C_2$  标 “ $\Sigma\Sigma\dot{\Phi}$ ”，点  $D_2$  标 “O”，点  $E_2$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_q$ ”；

点  $A_4$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_0$ ”，点  $B_4$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_d$ ”，点  $C_4$  标 “ $\Sigma\Sigma\dot{\Phi}$ ”，点  $D_4$  标 “O”，点  $E_4$  标 “ $\Sigma\dot{\Phi}_q$ ”；

点  $A_5$  标 “ $E_0$ ”，点  $C_5$  标 “U”，点  $D_5$  标 “O”；

点  $X_{20}$ 、 $Y_{20}$ 、 $Z_{20}$  分别标为  $\Sigma\dot{\Phi}_{00}$ 、 $\Sigma\dot{\Phi}_{d0}$ 、 $\Sigma\dot{\Phi}_{D0}$ 。

标识随着坐标点的位置的移动而移动，各标识与对应的作标点的相对位置保持不变；

l) 功角标识：表示功角的虚线通转子中心，与杠杆轴心重合，长不大于同步电机额定工作时  $C_0D_0$  线段长度的三分之一在功角范围内标 “ $\delta$ ”，功角两侧杠杆之间用圆弧连接，且圆弧顶点随杠杆的位置变化而变化，圆弧半径大于转子刚体圆的半径，圆弧圆心与定子轴心重合；

m) 励磁调节信号标识：

两种方法：

(a) 根据突变量算法，按  $\Delta E_0$  所占现在励磁电势百分长度，当  $\Delta E_0$  大于某一给定值时显示励磁电势突变量，当  $\Delta E_0$  为正值时，由励磁杠杆顶部向转子轴心排列， $\Delta E_0$  为负值时由转子轴心延励磁电势反方向排列，在显示屏幕上标识各调节信号及其颜色；

(b) 根据调节量算法，计算机计算的结果，按  $E_{01}$ 、 $E_{02}$  ……  $E_{0n}$  值，将各调节量以不同的颜色，按所占百分长度，调增信号依次由励磁杠杆顶部向转子轴心紧密排列，调减信号则由转子轴心顺次延励磁电势反方向直线紧密排列，在显示屏幕上标识各调节信号及其颜色；

n) PQ 曲线标识：根据同步电机端部发热极限、系统允许同步电机最大运行功角确定点  $M_0$  至点  $N_0$  的曲线，根据同步电机允许最大有功功率确定  $N_0O_0$  曲线，根据同步电机允许的最大定子磁通量、最大定子电流、最大定子电势确定  $O_0P_0$  曲线，根据同步电机允许的最大转子磁通

量、最大转子电流、最大转子电压确定  $P_0Q_0$  曲线；点  $M_0$ 、点  $Q_0$  均在  $D_0G_0$  直线上，点  $G_0$ 、点  $Q_0$  之间用细直线连接；曲线  $M_0N_0O_0P_0Q_0$ （不含直线段  $M_0Q_0$ ）用粗实线连接，颜色根据用户要求定；

o) 合成漏磁图报警圆：以点  $T_{20}$  为原点、以同步电机最大允许漏磁通量为半径画圆，此圆为报警圆，用粗彩线表示；

p) 同期图象要求：以点  $D_5$  为圆心，分别以线段  $D_5A_5$ 、 $D_5C_5$  为半径画虚线圆；

q) 机械模型可以动态逆时针旋转，屏面标识模型转速与实物转速的比值，转速比可以选择；

r) 图形报警显示：各电气量或磁通量报警时，标识变红色闪光，微机喇叭响，复合功角图及其分图、机端合成漏磁图画面相应线段变红色闪光，解除报警时报警标识或线段变红色不闪光；

s) 按上述显像要求，经程序处理可得到的六种图形可以根据使用方要求组合，任一组合画面可以和数字显示画面图 11 组合；可以小范围调整给定的复合功角图及其分图中的同步电机定子、转子半径，定子、转子轴心半径，杠杆粗细，弹簧连接点半径的大小；可以将机械模型图制作成各种三维立体机械模型图；可以根据用户要求调整模型颜色；

所述计算程序处理：

#### (1) 确定参数

给定参数：电机定子漏抗  $X_\sigma$ （保梯电抗），交轴同步电抗  $X_q$ ，同步电机电压、电流、频率折算系数  $K_U$ 、 $K_I$ 、 $K_\omega$ ，系统电压、频率折算系数  $K_{XU}$ 、 $K_{X\omega}$ ，有功、无功功率折算系数  $K_P$ 、 $K_Q$ 、 $K_m$ ，同步电机励磁电压及工各励电压折算系数  $K_L$   $K_{GL}$   $K_{BL}$ ，同步电机励磁电流及工、各励电流折算系数  $K_f$ 、 $K_{Gf}$ 、 $K_{Bf}$ ，负序电压折算系数  $K_F$ ，同步电机机端电压同期折算系数  $K_T$ 、 $K_N$ ，系统电压同期折算系数  $K_{XT}$ 、 $K_{XN}$ ，励磁调节信号电压折算系数  $K_{TJ}$ ，漏磁通系数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ ；主要参数允许范围：主要参数包括电机机端电压、定子电流、励磁电压、励磁电流、有功功率、无功功率、定子磁通量、转子磁通量、功角、系统电压；电机额定参数，主要包括：电机机端电压、定子电流、励磁电压、励磁电流、有功功率、无功功率、定子磁通量、转子磁通量、系统电压；

#### (2) 参数计算：

$$\begin{array}{lll}
 \text{a} & P_j = K_P P & \Sigma P = K_m P_j \\
 \text{b} & Q_j = K_Q Q & \Sigma Q = K_m Q_j \\
 \text{c} & I_{aj} = K_I I_a & I_{bj} = K_I I_b & I_{cj} = K_I I_c \\
 \text{d} & U_{abj} = K_U U_{ab} & U_{bcj} = K_U U_{bc} & U_{caj} = K_U U_{ca} \\
 \text{e} & I_{fj} = K_f I_L & I_{Gf} = K_{Gf} I_G & I_{Bf} = K_{Bf} I_{BY} \\
 \text{f} & F = K_\omega f & F_X = K_{X\omega} f_X
 \end{array}$$

$$g \quad U_{Fj} = K_F U_F$$

$$h \quad U_{xabj} = K_{XU} U_{xab} \quad U_{xbcj} = K_{XU} U_{xbc} \quad U_{xcqj} = K_{XU} U_{xca}$$

$$i \quad u_{Lj} = K_L u_L \quad u_{Gj} = K_{GL} u_G \quad u_{Bj} = K_{BL} u_B$$

### (3) 确定凸极同步电机直轴同步电抗 $X_d$ 值

确定凸极同步电机直轴同步电抗  $X_d$  值有两种方法:

- 根据同步电机通常工作时气隙电势  $E_s$  的值直接给定直轴同步电抗  $X_d$  值,  $X_d$  值不变;
- 根据同步电机气隙电势  $E_s$  与直轴同步电抗  $X_d$  的函数关系, 由  $E_s$  值确定  $X_d$  值;
- 绘制发电机空载 ( $I_a = 0$ ) 和零功率因数 ( $I_a = I_N$ ) 曲线, 即  $U = f_0(I_f)$  和  $U = f_N(I_f)$

曲线;

#### b) 确定同步电机气隙电势 $E_s$ 与直轴同步电抗 $X_d$ 的函数关系

根据  $U = f_0(I_f)$  和  $U = f_N(I_f)$  曲线图, 取  $I_{f1} \quad I_{f2} \quad \cdots \quad I_{fn}$   $n$  个励磁电流值, 由零功率因数曲线确定  $U = f_N(I_f)$  曲线上的与  $I_{f1} \quad I_{f2} \quad \cdots \quad I_{fn}$  对应的点  $B_1 \quad B_2 \quad \cdots \quad B_n$ , 过点  $B_1 \quad B_2 \quad \cdots \quad B_n$  分别作  $n$  个全等特性三角形 (其中  $CD$  垂直于横坐标,  $CD = I_N * X_\sigma$ ), 分别交空载特性曲线  $U = f_0(I_f)$  于点  $C_1 \quad C_2 \quad \cdots \quad C_n$ , 连接点  $O$  和点  $C_1$ , 并延长  $OC_1$  交过点  $B_1$  平行于纵坐标轴的直线于点  $A_1$ , 同理连接点  $O$  和点  $C_2$ 、 $\cdots$  连接点  $O$  和点  $C_n$ , 并延长  $OC_2 \cdots$  延长  $OC_n$ , 与平行于纵坐标轴的分别过点  $B_2 \cdots B_n$  的直线交于点  $A_2 \cdots A_n$ ,

则  $E_{s1} \quad E_{s2} \quad \cdots \quad E_{sn}$  所对应的同步饱和电抗分别为:  $X_{d1} = \frac{A_1 B_1}{I_N}$ ,  $X_{d2} = \frac{A_2 B_2}{I_N} \quad \cdots$   
 $X_{dn} = \frac{A_n B_n}{I_N}$ , 根据  $E_{s1}, E_{s2} \cdots E_{sn}$  一一对应的同步饱和电抗  $X_{d1}, X_{d2} \cdots X_{dn}$  的关系绘制气隙电势与饱和电抗的关系图,

#### c) 求 $E_s$

$$\text{令 } \dot{W} = P_j + jQ_j = W \angle \varphi \quad \dot{U}_a = \frac{U_{a0}}{\sqrt{3}} = e$$

$$\text{则 } \dot{I}_{aj} = I_{aj} \angle (-\varphi)$$

$$\dot{E}_s = e + j\dot{I}_{aj} * X_\sigma \quad E_s = |\dot{E}_s|$$

#### d) 将 $E_s$ 值代入 $X_d = f(E_s)$ 函数, 得 $X_d$ 值

### (4) 计算

$$a \quad \dot{H} = e + j\dot{I}_{aj} * X_q = H \angle \delta \quad \text{由此式确定 } \delta (90^\circ > \delta > -90^\circ)$$

$$b \quad I_d = I_{aj} \sin(\delta + \varphi)$$

$$c \quad I_q = I_{aj} \cos(\delta + \varphi)$$

$$d \quad a = (e * \cos \delta + I_d * X_d) * \cos \delta$$

$$e \quad b = (e * \cos \delta + I_d * X_d) * \sin \delta$$

$$f \quad c = e + I_d * X_d * \cos \delta$$

$$g \quad d = I_d * X_d * \sin \delta$$

$$h \quad f = e * \cos^2 \delta$$

$$i \quad g = \frac{1}{2} e * \sin 2\delta$$

j 励磁分量计算

两种算法:

(a) 突变量算法

设从某一时刻到现在的时间  $\Delta T$  内同步电机平均励磁电势为  $\Sigma E_0$ , 现在励磁电势为  $E_0$ , 设  $\Delta E_0 = E_0 - \Sigma E_0$ ,  $\Delta T$  值和采集励磁电势的次数可以设定;

(b) 调节量算法

设综合放大器自动励磁调节总量为  $\Sigma U$ , 各分量分别为:  $\Delta U = K_{TJ} U_1 \quad U' = K_{TJ} U_2$

$$\Delta f = K_{TJ} U_3 \quad \dots X = K_{TJ} U_n; \quad \Sigma U = K_{TJ} (U_1 + U_2 + \dots + U_n), \quad f_1 = \frac{K_{TJ} U_1}{\Sigma U} \quad f_2 = \frac{K_{TJ} U_2}{\Sigma U} \quad \dots \quad f_n = \frac{K_{TJ} U_n}{\Sigma U}$$

$$\text{计算 } E_{01} = f_1 \sqrt{a^2 + b^2} \quad E_{02} = f_2 \sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots \quad E_{0n} = f_n \sqrt{a^2 + b^2}$$

k 漏磁通量坐标计算

$$X_1 = K_1 a; Y_1 = K_1 b; X_2 = K_2 (f - a) + K_3 (c - a); Y_2 = K_2 (g - b) + K_3 (d - b); X_3 = X_1 + X_2; Y_3 = Y_1 + Y_2$$

i 磁通量标么值计算: 设同步电动机某磁通量在频率为额定值时, 磁通量标么值与相应电压标么值相同, 根据频率、电压、磁通量的关系, 确定电机励磁磁通、定子总磁通的标么值, 并用数字显示, 将计算值于给定值比较, 当大于规定值时报警;

j 根据需要计算各量标么值;

(5) 当同期并网或解列时, 既  $I_a = I_b = I_c = 0$  时, 将输入微机的各组同步电机电压与系统电压量进行下列计算

$$a \quad \dot{U} = K_T (u_{AB} + u_{BC} \angle 120^\circ + u_{CA} \angle 240^\circ) = U \angle \alpha$$

$$b \quad \dot{U}_x = K_{XT} (u_{xAB} + u_{xBC} \angle 120^\circ + u_{xCA} \angle 240^\circ) = U_x \angle \varepsilon$$

$$c \quad \frac{\dot{U}}{\dot{U}_x} = \frac{U}{U_x} \angle \delta_x$$

d  $\bar{\delta}_x = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{n}$  (其中  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  为一定时间内测得的第一、第二...第 n 个  $\delta_x$  的值, 且下一个测量值进入时, 舍去第一个  $\delta_1$  值, 再下一个测量值进入时, 舍去第二个  $\delta_2$  值, 以此类推进行新旧更换, 时间长短及 n 值可以设定)

$$e \quad h = K_N U_{abf} * \cos \bar{\delta}_x$$

$$f \quad i = K_N U_{abf} * \sin \bar{\delta}_x$$

$$g \quad j = K_{XN} U_{xabf}$$

(6) 将各种电气量于给定值比较, 当大于规定范围时报警。

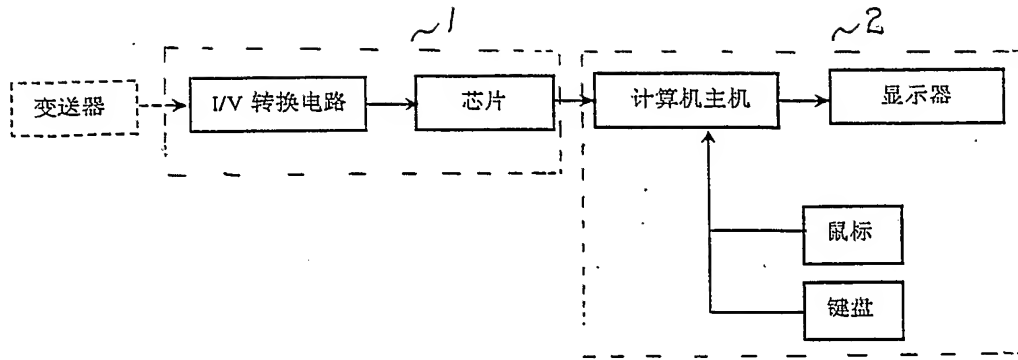


图 1

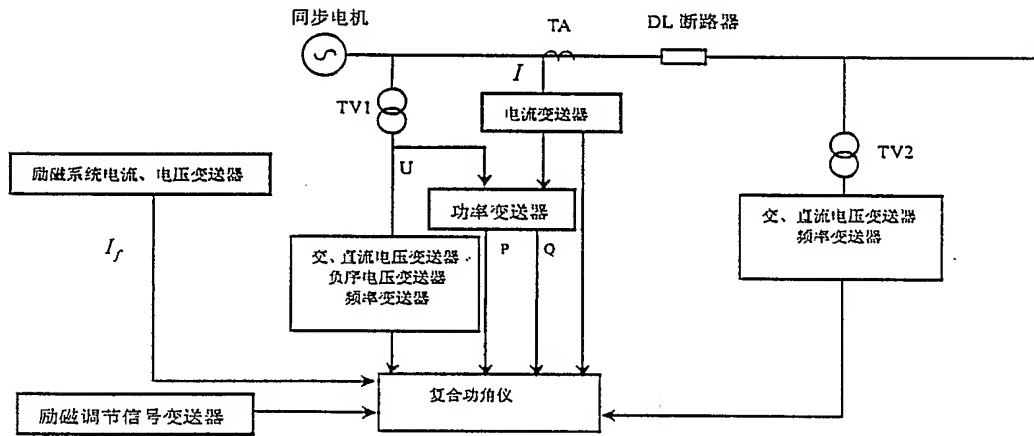


图 2

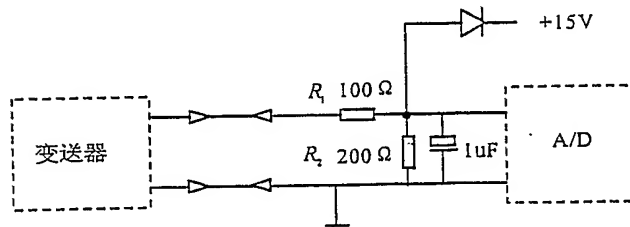
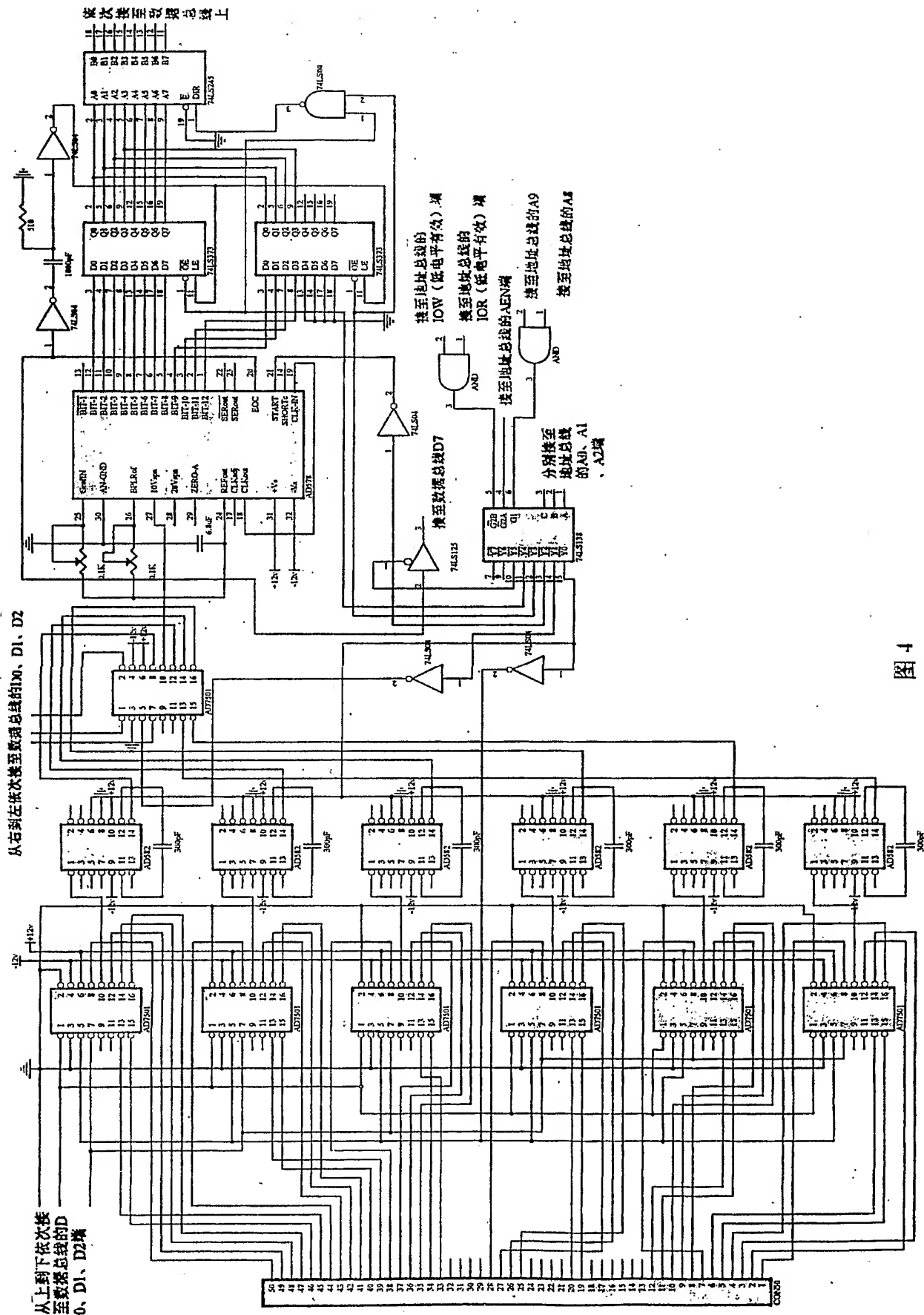


图 3



上

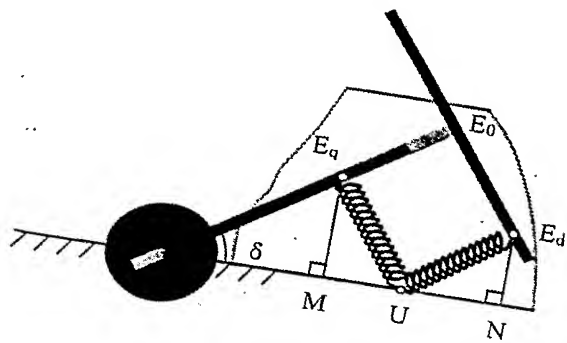


图 5

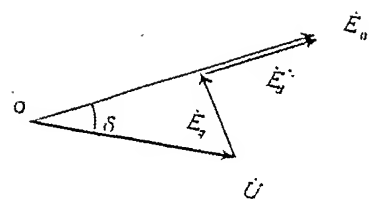


图 6

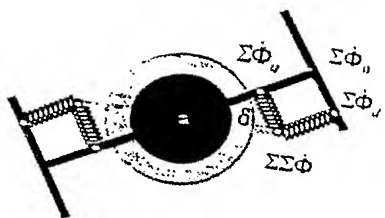


图 7

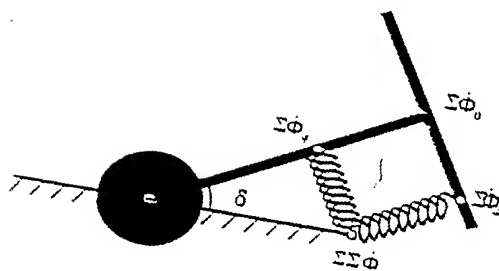


图 8

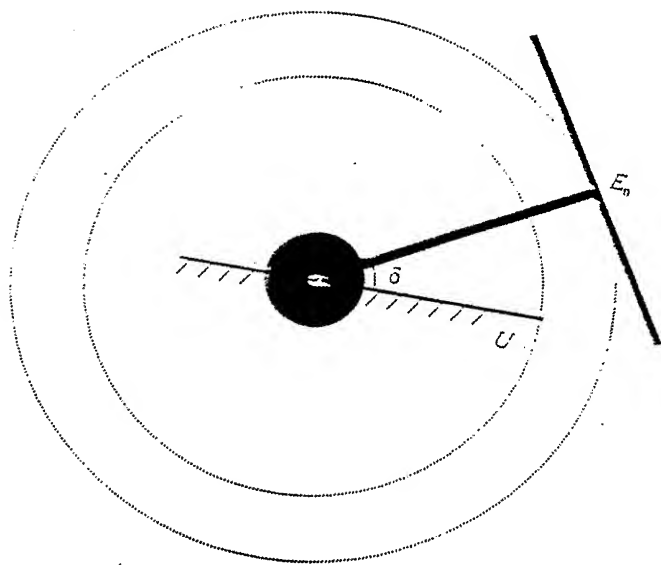


图 9

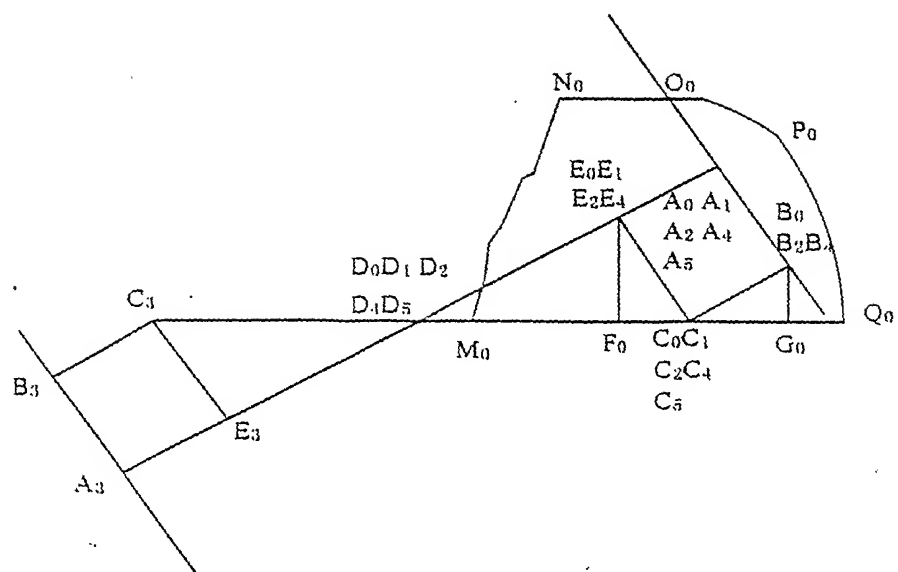


图 10

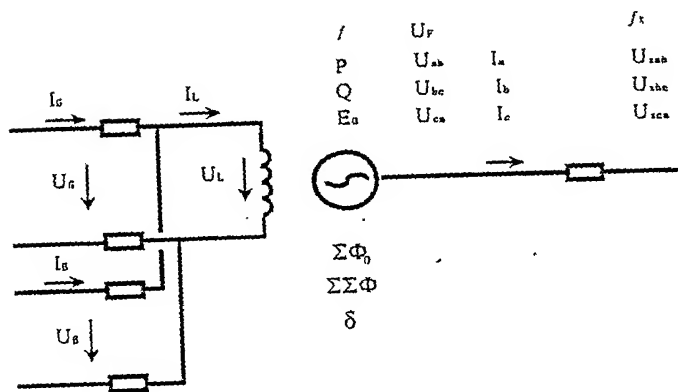


图 11



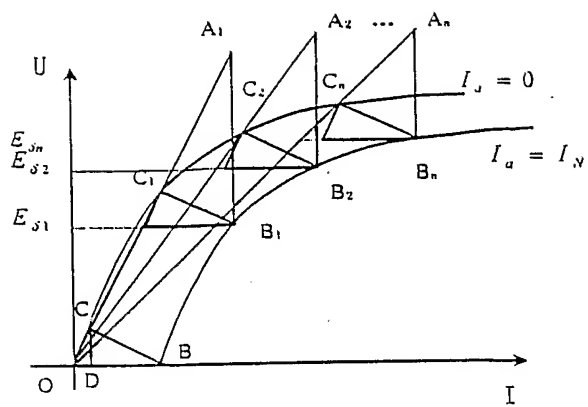


图 12

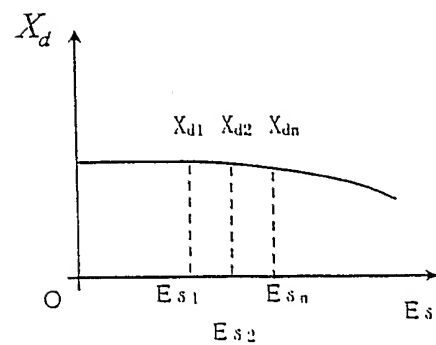


图 13

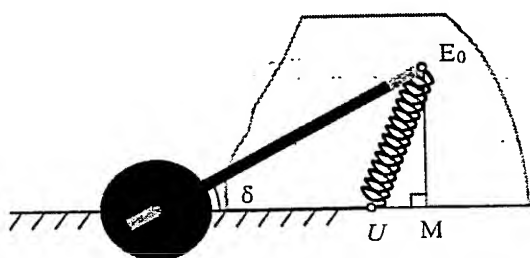


图 14

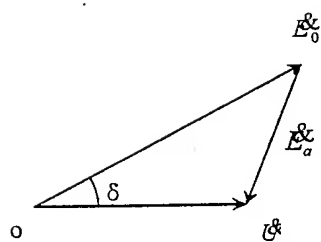


图 15

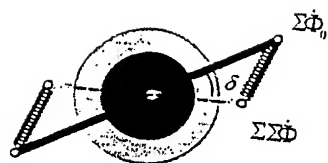


图 16

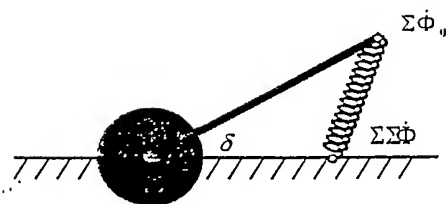


图 17

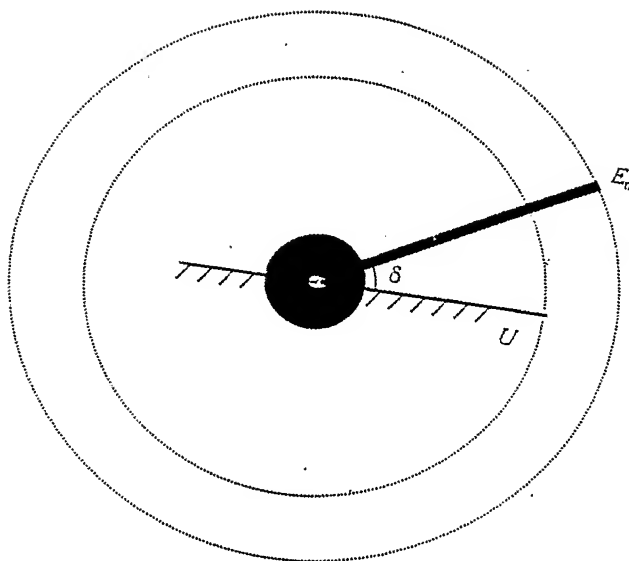


图 18

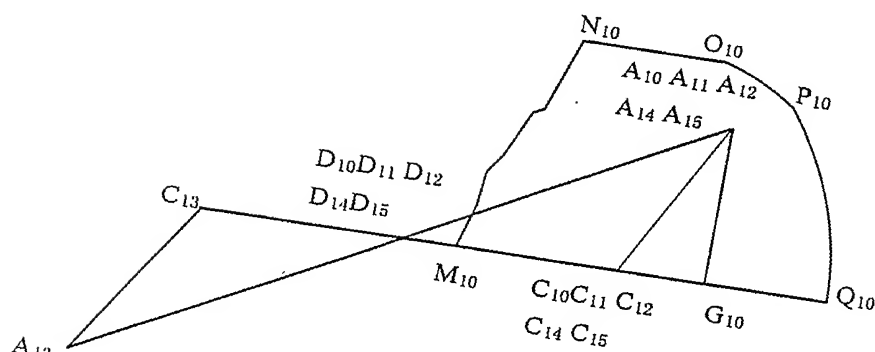


图 19

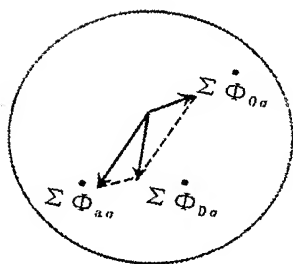


图 20

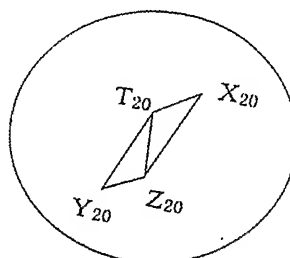


图 21

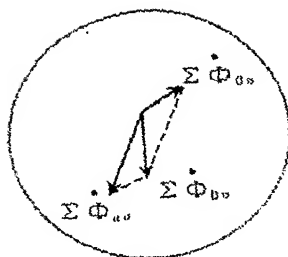


图 22

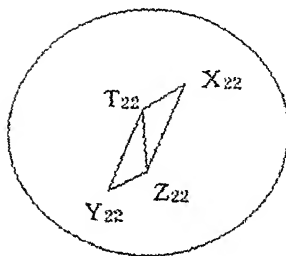


图 23

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/CN03/01153

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC<sup>7</sup> G01R31/34,25/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC<sup>7</sup> G01R31/34,31/00,25/00,21/06,21/133,21/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

CNPAT(1985-)

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI,EPODOC,PAJ, POWER,ANGLE,,MOTOR,SYNCHRON+,VECTOR

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN,Y,2516981 (BEIJING XUJI ELECTRICITY CO LTD) 16.OCT.2002 (16.10.2002),SEE FIGURE 1,PAGE 1,LINE 10—LINE 24.	1,2
Y	JP,A,2002357648 (HONDA MOTOR CO LTD) 13.DEC.2002 (13.12.02),SEE FIGURE 1、6、7,COLUMN 3,LINE 5—LINE 43	1,2
A	CN,Y,2427813 (CHONGQI SHUGUANG ELECTROMECHANICAL RESEARCH INS) 25.APR.2001 (25.04.01),SEE WHOLE DOCUMENT	3,4
A	CN,Y,2476034 (GUIZHOU ELECTRIC TEST RESEARCH INT) 06.FEB.2002 (06.02.02),SEE WHOLE DOCUMENT	3,4

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim (S) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 05.SEP.2004 (05.09.04)	Date of mailing of the international search report 21 . OCT 2004 (21 . 10 . 2004)
Name and mailing address of the ISA/CN 6 Xitucheng Rd., Jimen Bridge, Haidian District, 100088 Beijing, China Facsimile No. 86-10-62019451	Authorized officer Wang Xiaoping Telephone No. 86—10—62085735



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
Information on patent family members

International application No.  
PCT/CN03/01153

Patent document Cited in search report	Publication date	Patent family members	Publication date
CN2516981Y	16-10-2002	NONE	
JP2002357648A	13-12-2002	NONE	
CN2427813Y	25-04-2001	NONE	
CN2476034Y	06-02-2002	NONE	

## 国际检索报告

国际申请号

PCT/CN03/01153

## A. 主题的分类

IPC<sup>7</sup> G01R31/34,25/00

按照国际专利分类表(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

## B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类体系和分类号)

IPC<sup>7</sup> G01R31/34,31/00,25/00,21/06,21/133,21/00

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

中国专利文献(1985-)

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称和, 如果实际可行的, 使用的检索词)

WPI,EPODOC,PAJ,POWER,ANGLE,,MOTOR,SYNCHRON+,VECTOR

## C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求编号
Y	CN,Y,2516981(北京许继电气有限公司)2002年10月16日(16.10.2002) 附图1, 说明书第一页第10-24行。	1, 2
Y	JP,A,2002357648(日置电机株式会社)2002年12月13日(13.12.2002) 附图1、6、7, 说明书第三栏第5-43行。	1, 2
A	CN,Y,2427813(重庆蜀光机电科技研究所)2001年4月25日(25.04.2001) 全文	3, 4
A	CN,Y,2476034(贵州电力试验研究所)2002年2月6日(06.02.2002) 全文	3, 4

☐ 其余文件在 C 栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

\* 引用文件的专用类型:

“A” 明确叙述了被认为不是特别相关的一般现有技术的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先的申请或专利

“L” 可能引起对优先权要求的怀疑的文件, 为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布的在后文件, 它与申请不相抵触, 但是引用它是为了理解构成发明基础的理论或原理

“X” 特别相关的文件, 仅仅考虑该文件, 权利要求所记载的发明就不能认为是新颖的或不能认为是有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 权利要求记载的发明不具有创造性

“&amp;” 同族专利成员的文件

国际检索实际完成的日期

05.9月2004

国际检索报告邮寄日期

21.10月2004 (21.10.2004)

国际检索单位名称和邮寄地址

ISA/CN

中国北京市海淀区西土城路6号(100088)

传真号: 86-10-62019451

受权官员



电话号码: 86-10-62085735

国际检索报告  
关于同族专利成员的情报

国际申请号  
PCT/CN03/01153

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利成员	公布日期
CN2516981Y	16-10-2002	无	
JP2002357648A	13-12-2002	无	
CN2427813Y	25-04-2001	无	
CN2476034Y	06-02-2002	无	